

AALTO-YLIOPISTO

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Elektroniikan laitos

Valaistusyksikkö

Johannes Raunio

HEHKULAMPPUJEN KORVAAMINEN SISÄVALAISTUKSESSA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 10.5.2010.

Työn valvoja Professori Liisa Halonen

Työn ohjaaja TkT Eino Tetri

Tekijä: Johannes Raunio

Työn nimi: Hehkulamppujen korvaaminen Sisävalaistuksessa Sivumäärä: 68

Päivämäärä: 7.5.2010

Elektroniikan laitos/Valaistusyksikkö

Professori: S-118 Valaistustekniikka ja sähköinen talotekniikka

Työn valvoja: Professori Liisa Halonen

Työn ohjaaja: TkT Eino Tetri

Tiivistelmäteksti:

Asetuksen (EY) N:o 244/2009 vaatimukset kotitalouksien ympäristöteille lampuille poistavat hehkulamput myynnistä vuoteen 2012 mennessä. Korvaavia lamppeja hehkulamppujen tilalle ovat pääosin LED-, pienloiste- ja halogeenilamput. Tässä työssä luotiin katsaus myynnissä olevien korvaavien lamppejen ominaisuuksiin ja hintoihin, tehtiin mittauksia myynnissä olevilla tuotteilla sekä arvioitiin korvaamisen kustannuksia kuluttajan näkökulmasta.

Mittausten ja testausten tarkoituksena oli selvittää myynnissä olevien LED-, pienloiste- ja halogeenilamppujen valo- ja sähkötekniisiä ominaisuuksia ja yleisesti korvaavien lamppejen soveltuvuutta asuinrakentamiseen. Lampeista mitattiin muun muassa valotehokkuus, väriominaisuudet sekä tehokerroin ja virran harmoniset yliaallot. Polttokokeessa mitattiin valovirran alenema käytössä. Näiden lisäksi testattiin suljetun valaisimen, jossa lämpöolosuhteet ovat normaalia huoneenlämpötilaa vaativammat, vaikutusta LED- ja pienloistelamppujen valontuottoon. Lisäksi myynnissä olevien pienloistelamppujen syttymis- ja lämpenemisajat mitattiin. Himmentämisen vaikutusta valo- ja sähkötekniisiin arvoihin myös tutkittiin.

Lamppujen valonjako mitattiin goniometrissä sekä ilman valaisinta että eri tyyppisissä kotitalouksissa käytetyissä valaisimissa. Näiden mittausten tarkoituksena oli selvittää, muuttuuko valaistustulos vaihdettaessa hehkulamput LED- ja pienloistelamppuihin. Valaistustulosta testattiin DIALux- valaistuslaskentaohjelmalla syöttämällä ohjelmalle goniometrissä mitattujen lamppeiden ja valaisimien valonjakotiedot.

Avainsanat: Sisävalaistus, Eco-Design, hehkulamppujen korvaaminen, LED- lamput, pienloistelamput, korvaavien lamppeiden valo- ja sähkötekniiset ominaisuudet, valaistustulos, valaistusvoimakkuus, kustannukset.

Author: Johannes Raunio

Name of the work: Replacing incandescent lamps in indoor lighting. Number of pages: 68

Date: 7.5.2010

Department of Electronics/Lighting Unit

Professorship: S-118 Lighting technology

Supervisor: Liisa Halonen

Instructor: Eino Tetri

Abstract text:

Requirements of the European Commission regulation (EC) No 244/2009 for non-directional household lamps remove incandescent lamps from the market by the year 2012. Incandescent lamps will be replaced mainly by LED-, CFL- and halogen lamps. In this paper properties of substitute lamps existing in the market was investigated, measurements were done on substitute lamps and costs of the replacement was calculated from the consumer's perspective.

Purpose of measuring and testing substitute lamps was to find out luminous and electrical characteristics of the substitute lamps and generally test the applicability of the substitute lamps in households. The measured characteristics were luminous efficiency, color parameters, power factor and harmonic content of the lamp current. In lamp burning test the decrease of luminous flux was measured. In addition to these the effect of enclosed luminaire in which the temperature conditions are non-standard to luminous output of LEDs and CFLs was measured. Also starting- and warm-up times of CFLs were measured. The effect of dimming to electrical and luminous values was investigated as well.

Luminous distribution of the substitute lamps was measured in a goniometer both without luminaire and with typical household luminaires. The purpose of the goniometric measurements was to investigate the difference in room illuminance levels when incandescent lamps are replaced by LEDs and CFLs. The simulation was done with DIALux calculation program by inputting the goniometric data of the lamps and luminaires to the program.

Keywords: EcoDesign, replacing incandescent lamps, LED- lamps, CFLs, luminous and electrical characteristics of substitute lamps, illumination level, lamp costs.

Alkulause

Tämä diplomityö on tehty TKK:n elektroniikan laitoksen valaistusyksikössä osana EkoValo- projektia.

Haluan aluksi kiittää valaistusyksikön koko henkilökuntaa kannustavasta ilmapiiristä. Muutamat henkilöt haluan nostaa esille ja lausua heille erikseen kiitokseni. Ensinnäkin haluan kiittää Liisa Halosta työn valvomisesta ja Eino Tetriä erinomaisesta ohjauksesta. Kiitokseni myös Kimmo Rajalalle ja Martti Paakkiselle, jotka auttoivat sähköasennuksiin liittyvissä asioissa. Monet kiitokset myös Vesa Sippolalle, joka opasti goniometrin käytössä ja Horatiu Albulle, joka auttoi harmonisten yliaaltojen mittaamisessa.

Espoossa toukokuun 10. päivänä 2010

Johannes Raunio

Sisällysluettelo

Alkulause.....	4
Sisällysluettelo.....	5
Symboli- ja lyhenneluettelo.....	7
1 Johdanto.....	8
2 EcoDesign- direktiivi.....	10
2.1 Direktiivin tausta ja keskeiset piirteet	10
2.2 Asetus (EY) N:o 244/2009	10
2.2.1 Yleistä asetuksesta	10
2.2.2 Tehokkuusvaatimukset	10
2.2.3 Toimintavaatimukset	13
2.2.4 Tuotetietovaatimukset.....	14
2.2.5 Markkinavalvonta	15
2.3 Muut direktiivit	15
2.3.1 Ympäristödirektiivit RoHS ja WEEE	15
2.3.2 Energiatehokkuusmerkintädirektiivi.....	16
3 Lamppujen tekniikka	17
3.1 Pienloistelamppu	17
3.1.1 Loistelampun toimintaperiaate.....	17
3.1.2 Syttyminen	18
3.1.3 Lämpeneminen.....	18
3.1.4 Ympäristön lämpötilan ja polttoasennon vaikutus valovirtaan.....	18
3.1.5 Amalgaamilamput.....	19
3.1.6 Valovirran alenema ja käyttöikä	20
3.1.7 Pienloistelampputyypit	20
3.2 LED- lamppu.....	21
3.2.1 LED:n toimintaperiaate.....	21
3.2.2 Väriominaisuudet.....	22
3.2.3 Lämpeneminen ja lämpötilan vaikutus ominaisuuksiin.....	22
3.2.4 Optiset ominaisuudet	23
3.3 Halogeenilamppu	23
3.3.1 Energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät.....	23
3.3.2 Korvaavat halogeenilampputyypit.....	24
3.4 Korvaavien lamppujen liitälaitteet	24
3.4.1 Pienloistelampun sähköiset ominaisuudet	24
3.4.2 LED:n sähköiset ominaisuudet	25
3.4.3 LED- ja pienloistelampun tehokerroin.....	25
4 Markkina- ja tuotekatsaus.....	26
4.1 Pienloistelamput	26
4.1.1 Tuotteiden ominaisuudet.....	26
4.1.2 Valonsäätö	26
4.1.3 Elohopean määrä pienloistelampuissa	26
4.1.4 Erityyppisten pienloistelamppujen hintojen vertailu	26
4.2 Halogeenilamput	27
4.2.1 Yleistä	27
4.2.2 Energialuokkien B ja C tuotteet	27
4.3 LED-lamput.....	28
4.3.1 Yleistä	28
4.3.2 Ympärisäteilevät tuotteet	28
5 Mittaukset.....	29
5.1 Yleistä.....	29

5.1.1	Mittauksissa käytetyt lamput ja valaisimet	29
5.2	Mittausmenetelmät	31
5.2.1	Valoteknisten arvojen määrittäminen integroivassa pallossa	31
5.2.2	LED- ja pienloistelamppujen stabilointiajat integroivassa pallossa	32
5.2.3	Polttokoe	32
5.2.4	LED- lamppujen lämpenemisominaisuuksien mittaaminen	33
5.2.5	Pienloistelamppujen lämpenemisaikojen mittaaminen	33
5.2.6	Pienloistelamppujen syttymisaikojen mittaaminen	33
5.2.7	Harmonisten yliaaltojen mittaaminen	34
5.2.8	Himmennyksen vaikutus valo- ja sähkötekniikan arvoihin	34
5.2.9	Valovirran aleneman määrittäminen suljetussa IP44- luokan valaisimessa	34
5.2.10	Valonjaon mittaaminen goniometrillä (tulokset luku 6)	35
5.2.11	Valaistustuloksen simulointi (tulokset luku 6)	35
5.3	Mittaustulokset	35
5.3.1	Valovirta ja valotehokkuus	35
5.3.2	Väriominaisuudet	36
5.3.3	Valovirran alenema ja lamppujen kuolleisuus	37
5.3.4	Pienloistelamppujen syttymisaajat	38
5.3.5	Pienloistelamppujen lämpenemisaajat	39
5.3.6	LED- lamppujen valovirta syttymishetken jälkeen ja suljetun valaisimen vaikutus siihen	40
5.3.7	Suljetun valaisimen vaikutus pienloistelamppujen valontuottoon	41
5.3.8	Lamppujen kirkkaus	42
5.3.9	Sähköiset ominaisuudet - Tehokerroin ja harmoniset yliaallot	42
5.3.10	Himmennyksen vaikutus valo- ja sähkötekniikan arvoihin	44
5.4	Yhteenveto mittaustuloksista	44
5.4.1	Mitattujen lamppujen valotekniset ominaisuudet	44
5.4.2	Mitattujen lamppujen sähköiset ominaisuudet	45
5.4.3	Ympäristö- ja käyttöolosuhteiden vaikutus valontuottoon	45
6	Valaistustulos asuinrakentamisessa	46
6.1	Yleistä	46
6.2	Testausmenetelmä ja mukaan valitut lamput	46
6.3	Korvaavien lamppujen valonjako	46
6.4	Valaistustulos ilman valaisinta	48
6.5	Valaistustulos erityyppisillä valaisimilla	49
6.5.1	Ripustettava kattovalaisin	49
6.5.2	Varjostin	52
6.5.3	Pöytävalaisin	54
6.5.4	Valaisinoptiikan vaikutus valonjakoon ja valaistustulokseen	56
6.6	Yhteenveto	57
7	Kustannukset	58
7.1	Yleistä	58
7.1.1	Kustannuslaskennassa käytetty menetelmä	58
7.1.2	Kustannusarvioinnin lähtötiedot ja oletukset	58
7.2	Korvaavien lamppujen vuotuinen kustannus	59
7.2.1	Vuotuinen kustannus	59
7.2.2	Vuotuisen kustannuksen jakautuminen osto- ja käyttökustannuksiin	60
7.2.3	Käyttömäärän vaikutus vuosikustannuksiin	61
7.2.4	Sähkön hinnan vaikutus korvaavien lamppujen kustannuksiin	62
7.2.5	Hukkalämmön hyödynnettävyyden vaikutus kustannukseen	63
8	Johtopäätökset	65
9	Lähteluettelo	67

Symboli- ja lyhenneluettelo

CCT	Correlated Color Temperature – Ekvivalentti värilämpötila
CRI	Color Rendering Index – Värintoistoindeksi
E14	Lampun kanta E14
E27	Lampun kanta E27
E	Valaistusvoimakkuus
E _I	Energiatehokkuusindeksi
I	Virta
IP44	Valaisimen IP- luokka 44
Hg	Elohopea
LED	Light Emitting Diode
P	Teho
PF	Power Factor – Tehokerroin
R _a	Värintoistoindeksi
THD	Total Harmonic Distortion
U	Jännite
UV	Ultravioletti
Φ	Valovirta

1 Johdanto

Hehkulamppu on edelleen kaikkein yleisin kotitalouksissa käytetty valonlähde. Suomessa on tällä hetkellä yli 46 miljoonaa hehku- ja halogeenilamppua, noin 20 kappaletta/kotitalous. (Motiva, 2007) Hehkulamput ovat paitsi hyvin yleisesti käytetty, myös kaikkein energiatehottomin vaihtoehto valonlähteeksi sisävalaistuksessa. Muista vaihtoehtoista tärkeimmät ovat LED- ja pienloistelamput sekä B- ja C-energialuokkien halogeenilamput.

Hehkulamppujen valotehokkuus on noin 12 lm/W. Vaihtoehtoisten LED- ja pienloistelamppujen valotehokkuus on noin 40-60 lm/W. Kun verrataan näitä lukuja keskenään, havaitaan että hehkulamppujen korvaaminen vaihtoehtoisilla lampputyypeillä mahdollistaa huomattavan säästön valaistukseen käytetyn energian kulutuksessa. Energiansäästöpotentiaali on kaiken kaikkiaan noin 60 %, mikä on noin 1400 GWh vuodessa. (Motiva, 2007) On kuitenkin erittäin todennäköistä, että LEDien kehittymisen ja valotehokkuuden parantumisen myötä energiansäästö on tulevaisuudessa vielä tätäkin suurempi. Lampputyypin valinnalla ja lamppujen suunnittelulla on siis mahdollista vaikuttaa energiantuotannosta aiheutuviin ympäristöpäästöihin ja päästöistä aiheutuviin kustannuksiin.

Euroopan komissio on asettanut tiettyjä tavoitteita ja määräyksiä pyrkien entistä ympäristöystävällisempiin tuotteisiin. Lähtökohtana ympäristöystävällisempien tuotteiden valmistamiselle on EcoDesign puitedirektiivi, joka antaa suuntaviivat erikseen asetettaville tuoteryhmäkohtaisille vaatimuksille. Kotitalouksien ympärisäteileviin lamppuihin liittyen on 18.3.2009 annettu asetus (Komission asetus EY N:o 244/2009), joka määrittää tiettyjä vaatimuksia tuotteiden suunnittelulle. Kyseinen asetus ei varsinaisesti kiellä mitään lampputyyppejä, mutta asetuksen määrittämien lamppujen energiatehokkuusvaatimusten seurauksena suurin osa hehkulampputuotteista tulee poistumaan markkinoilta portaittain vuoteen 2012 mennessä.

Tässä työssä tutkitaan hehkulampun korvaamisen vaikutuksia erityisesti kuluttajan näkökulmasta. Tavoitteena on ensin kirjoittaa auki EcoDesign- direktiivi, ja asetus 244 tähän liittyen. Tarkoituksena on tiedottaa valaistusta koskevista vaatimuksista ja seurata tilannetta mahdollisiin uusiin vaatimuksiin liittyen. Lisäksi tarkoituksena on kertoa asetuksen vaikutuksista ja toimenpiteistä asetuksen täytäntöön panemiseksi. Kuluttajien näkökulmasta on erityisesti tiedotettava millä aikataululla ja mitä tuotteita poistuu markkinoilta. Asetuksen 244 lisäksi EcoDesign- direktiiviin liittyy muitakin direktiivejä. Hyvin tärkeässä asemassa on energiatehokkuusmerkintädirektiivi, koska usein lamppujen energiatehokkuudesta puhuttaessa viitataan nimenomaan lampun energialuokkaan eikä valotehokkuuteen. Asetukseen 244 hyvin läheisesti liittyviä direktiivejä ovat myös ympäristödirektiivit WEEE ja RoHS. Näiden direktiivien merkitys korostuu korvaavien lamppujen sisältämien ympäristölle haitallisten materiaalien takia.

Toisena tavoitteena EcoDesign- direktiiviin liittyen on arvioida hehkulamppujen korvaamisen taloudellisia vaikutuksia. Kustannusarviossa selvitetään lamppujen kustannusvaikutusta kuluttajien näkökulmasta. Monet korvaavat lampputyypit (erityisesti LED- lamput) ovat vielä huomattavan hinnakkaita. Ne kuitenkin kestävät käytössä merkittävästi pitempään kuin hehkulamput ja kuluttavat olennaisesti vähemmän sähköä. Valmistajat mainostavat lamppujensa maksavan itsensä takaisin pienempinä energiakustannuksina ja pitempänä elinikänä. Erityisen tärkeää kuluttajien näkökulmasta on selvittää pitääkö tämä paikkansa, eli ovatko korvaavat lamput pitkällä aikavälillä hehkulamppuja kannattavampi investointi.

Kolmas keskeinen tavoite on luoda katsaus korvaavien lamppujen markkinatilanteeseen. Tarkoituksena on luoda mahdollisimman kattava läpileikkaus eri valmistajien markkinoilta löytyvistä tuotteista ja tiedottaa niiden ominaisuuksista ja hinnoista. Tuotekatsaukseen on otettu mukaan kaikki tärkeimmät ympärisäteilevät, hehkulamput korvaavat lampputyypit, joita ovat LED-, pienloiste- ja halogeenilamput.

Neljäs päätavoite on korvaavien lamppujen mittaaminen ja testaaminen. Tämä on kuluttajien näkökulmasta tärkeää sen vuoksi, että erityisesti LED- ja pienloistelamppujen valo- ja sähkötekniset ominaisuudet ovat huomattavan erilaiset hehkulamppuihin verrattuna. Lisäksi korvaavat lamput voivat olla huomattavasti hehkulamppuja kookkaampia ja painavampia. Suurimpia ongelmia korvaavien lamppujen käyttöön liittyen ovat korvaavien lamppujen valontuotto ja valovirran pysyvyys käytössä, käyttö- ja ympäristöolosuhteiden vaikutus korvaavien lamppujen valovirtaan sekä pienloistelamppujen syttymis- ja lämpenemisviive.

Mittauksin ja testauksin pyrittiin selvittämään korvaavien lamppujen valo- ja sähkötekniisiä ominaisuuksia. Mittauksiin hankittiin LED-, pienloiste-, ja halogeenilamppuja. Lampuista mitattiin tärkeimmät valo- ja sähkötekniset arvot. Tärkeimpiä mitattuja valotekniisiä arvoja ovat valovirta, värilämpötila ja värintoistoindeksi. Sähköteknisistä arvoista tärkeimmät ovat lamppujen tehokerroin ja lampun virran harmonisten yliaaltojen osuus, jotka liittyvät läheisesti toisiinsa. Viime aikoina on ollut paljon puhetta erityisesti pienloistelamppujen harmonisista yliaalloista. Harmonisten yliaaltojen mittauksin selvitettiin, kuinka nykyisin myynnissä olevat korvaavat lampputyypit vaikuttavat sähköön laatuun. Varsinaisten valo- ja sähkötekniisten arvojen lisäksi tutkittiin arvojen pysyvyyttä käytössä. Polttokokeessa selvitettiin lamppujen valovirran alenemaa käytön aikana.

Mittauksin ja testauksin selvitettiin myös korvaavien lamppujen soveltuvuutta asuinrakentamiseen. Tätä tarkoitusta varten tutkimuksiin otettiin mukaan neljä asuinrakentamisessa tyypillistä hehkulamppuvalaisinta. Kolme valaisimista oli avoimia pöytä- ja yleisvalaisimia, joilla testattiin valaistustulosta, kun hehkulamput korvataan kussakin valaisimessa korvaavilla lampputyypeillä. Näitä valaisimia testattiin vertailemalla hehkulamppujen ja niitä valovirraltaan vastaavien korvaavien lampputyypien valaistustulosta eli valaistusvoimakkuuden jakautumista huoneessa. Yksi tutkimuksessa mukana olleista valaisimista oli suljettu valaisin, jossa lämpöolosuhteet ovat korvaavan LED- ja pienloistelampun kannalta vaativammat kuin avoimessa valaisimessa. Suljetun valaisimen avulla testattiin, kuinka paljon suljettu valaisin vaikuttaa LED- ja pienloistelampun valovirtaan.

2 EcoDesign- direktiivi

2.1 Direktiivin tausta ja keskeiset piirteet

EcoDesign- direktiivi (2009/125/EY), joka korvaa niin sanotun EuP- direktiivin (2005/32/EY), on puitedirektiivi vaatimuksista energiaa käyttävien tuotteiden ekologiselle suunnittelulle. Se ei siis suoraan määrittele vaatimuksia millekään tuotteille, mutta antaa puitteet, joiden pohjalta voidaan myöhemmin asettaa tuoteryhmäkohtaisia tarkkoja määräyksiä. EcoDesign-direktiivi on yleisdirektiivi, joka kattaa suuren määrän tuotteita. Sen kattamiin tuotteisiin lukeutuu käytännössä kaikki EU:n alueella myytävät energiaa kuluttavat tuotteet.

EcoDesign eli ”ekosuunnittelu” tarkoittaa Euroopan komission aloitetta tuoda ympäristönäkökulma mukaan tuotteiden suunnitteluun. Ekosuunnittelu tähtää tuotteiden energiankulutuksen vähentämiseen huomioiden tuotteiden koko elinkaaren. Ekosuunnitteluvaatimukset täyttävien tuotteiden käyttöönottoa edistetään eri keinoin. Tärkein näistä keinoista on lainsäädäntö, jonka avulla pyritään valmistamaan mahdollisimman energiatehokkaita tuotteita. Lainsäädäntöön liittyy myös kuluttajien tiedottaminen tuotteiden energiatehokkuudesta. Tuotteiden valmistajilta vaaditaan riittäviä merkintöjä tuotteiden energiatehokkuudesta, jolloin myös kuluttajilla on mahdollisuus vaikuttaa ympäristön puolesta vertailemalla eri tuotteita keskenään. (EY, 2005) ja (EY, 2009b).

2.2 Asetus (EY) N:o 244/2009

2.2.1 Yleistä asetuksesta

Euroopan komission asetus N:o 244/2009 on asetus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2005/32/EY täytäntöön panemisesta ympärisäteilevien kotitalouslamppujen osalta. Asetus on annettu 18.3.2009 ja se antaa tarkat ekosuunnitteluvaatimukset kyseiseen ryhmään kuuluvien lamppujen suunnitteluun. Asetus kattaa hehkulamppujen sekä LED- ja pienloistelamppujen lisäksi kaikki muutkin ympärisäteilevät kotitalouslampputyypit.

Asetus ei kuitenkaan koske kaikkia ympärisäteileviä kotitalouslamppuja. Asetus ei esimerkiksi koske lamppuja, joiden valovirta on alle 60 lm. Myös loistelamput, joissa ei ole sisäistä virranrajoitinta on vapautettu asetuksen vaatimuksista. Asetus ei myöskään koske suuntaavia lamppuja, joiden valokeilan leveys on alle 120°.

Asetuksessa esitetyt ympärisäteilevien kotitalouslamppujen ekosuunnitteluvaatimukset eivät kaikki astu heti voimaan. Kutakin ekosuunnitteluvaatimusta sovelletaan vaiheittain. Vaiheiden vaatimukset astuvat voimaan 1. syyskuuta vuosina 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 ja 2016. Ekosuunnitteluvaatimukset on luokiteltu asetuksessa lamppujen tehokkuusvaatimuksiin, toimintavaatimuksiin ja tuotetietovaatimuksiin. (EY, 2009a)

2.2.2 Tehokkuusvaatimukset

Tehokkuusvaatimukset asettavat tiettyjä vaatimuksia lamppujen valotehokkuudelle (lm/W). Vaatimukset astuvat voimaan vaiheittain vuosien 2009 ja 2016 välillä ja niiden myötä energiatehokkuudeltaan huonot lampputyypit poistuvat myynnistä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kun asetuksen energiatehokkuuden parannustoimenpiteet on saatu päätökseen 1.9.2016 jälkeen, kaikki myynnissä olevat kirkkaat lamput ovat vähintään energialuokka B ja himmeäkupuiset lamput energialuokkaa A.

Energiatehokkuusvaatimukset on asetuksessa 244 esitetty matemaattisina kaavoina, joiden avulla voidaan laskea lampun tiettyä valovirran (Φ) mitoitusarvoa vastaava suurin sallittu mitoitusaste (P). Seuraavassa esitetään hieman yksityiskohtaisemmin, kuinka asetus tulee vaiheittain voimaan ja mitä lamputyyppejä poistuu kussakin vaiheessa myynnistä käyttäen apuna asetuksesta 244 (EY, 2009a) löytyviä eri vaiheissa voimaan tulevia valotehokkuusvaatimusten kaavoja sekä kappaleesta 2.3.2 löytyviä energialuokan määräytymiskaavoja.

1.9.2009 (vaihe 1)

Tehokkuusvaatimukset

Vaiheessa 1 yli 950 lm kirkkaiden lamppujen valotehokkuusvaatimukset kovenevat. Käytännössä vaatimus koskee vähintään 100W hehkulamppuja, joiden valovirta on noin 1200 lm. Suurin sallittu mitoitusaste yli 950 lm lampuille lasketaan 1. vaiheessa kaavalla 1:

$$P = 0,8 * (0,88\sqrt{\Phi} + 0,049\Phi) \quad (1)$$

Energialuokan määräytymiskaavoista (ks. kappale 2.3.2) nähdään, että kaava 1 vastaa energialuokan C vaatimustasoa. Kaavaa apuna käyttäen voidaan laskea, että 1200 lm lampun enimmäisteho voi vaiheessa 1 olla enintään 71 W. Tämä tarkoittaa, että 1200 lm lampun valotehokkuuden täytyisi olla noin 17 lm/W. Koska 1200 lm hehkulampun, teho on 100 W ja valotehokkuus vain 12 lm/W, ne poistuivat myynnistä 1.9.2009.

Himmeiden lamppujen vaatimus asetetaan heti vaiheen 1 alusta lähtien korkeimmalle tasolle. Himmeiden lamppujen suurin sallittu mitoitusaste vaiheissa 1-6 määräytyy kaavan 2 mukaan:

$$P = 0,24 * \sqrt{\Phi} + 0,0103\Phi \quad (2)$$

Tämä vastaa energialuokan A vaatimustasoa (ks. kappale 2.3.2). Kaava koskee kaikkia himmeitä lamppuja valovirtaan katsomatta. Koska himmeät hehkulamput eivät yllä luokkaan A, ne poistuivat myynnistä 1.9.2009.

Toimintavaatimukset

Energiatehokkuusvaatimusten lisäksi vaiheen 1 alusta lähtien astuvat voimaan myös 1. toimintavaatimukset, jotka koskevat LED- ja pienloistelamppuja. Toimintavaatimukset ovat voimassa vaiheen 5 alkuun, jolloin astuvat voimaan 2. toimintavaatimukset. Toimintavaatimukset tuovat parannuksia LED- ja pienloistelamppujen ominaisuuksiin (ks. kappale 2.2.3)

1.9.2010 (vaihe 2)

Tehokkuusvaatimukset

Vaiheessa 2 yli 725 lm kirkkaiden lamppujen energiatehokkuusvaatimus kovenee. Käytännössä vaatimus koskee 75 W kirkkaita hehkulamppuja, joiden valovirta on noin 935 lm. Kaavaa 1 sovelletaan nyt kaikille yli 725 lm kirkkaille lampuille, joiden suurin sallittu mitoitusaste voidaan laskea kaavan avulla. Energialuokan avulla ilmaistuna kaikkien yli 725 lm kirkkaiden lamppujen on oltava vaiheen 1 alusta lähtien vähintään energialuokkaa C, kuten voidaan nähdä energialuokkien määräytymiskaavoista (ks. kappale 2.3.2).

Kaavan 1 avulla voidaan laskea, että 935 lm lampun teho voisi vaiheessa 2 olla enintään noin 58 W. Tämä vastaa valotehokkuutta 16 lm/W. Koska 935 lm hehkulampun teho on 75 W ja valotehokkuus vain 12,5 lm/W, ne poistuvat myynnistä 1.9.2010.

Tuotetietovaatimukset

Energiatehokkuusvaatimuksen lisäksi astuvat 1.9.2010 voimaan myös tuotetietovaatimukset. Tuotetietovaatimukset koskevat kaikkia lamppuja paitsi hehkulamppuja, jotka eivät täytä vaiheen 4 tehokkuusvaatimuksia. Tuotetietovaatimukset velvoittavat valmistajia yhdenmukaistamaan lamppujen ominaisuuksista tiedottamista (ks. kappale 2.2.4).

1.9.2011 (vaihe 3)

Tehokkuusvaatimukset

Vaiheen 3 energiatehokkuusvaatimukset koskevat yli 450 lm lamppuja. Vaiheessa 3 kaikkiin yli 450 lm kirkkaisiin lamppuihin sovelletaan kaavaa 1, jonka avulla voidaan laskea suurin sallittu mitoitus-teho. Kaava 1 vastaa energialuokan C vaatimustasoa, joten kaikkien yli 450 lm kirkkaiden lamppujen on vaiheessa 3 oltava vähintään energialuokkaa C.

Käytännössä vaiheen 3 vaatimuksen vaikutusalueeseen kuuluvat 60 W hehkulamput, joiden valovirta on 700 lm. Taulukon kaavojen mukaan 700 lm lampun valovirta voi vaiheessa 3 olla enintään 46 W, joka vastaa 15 lm/W valotehokkuutta. 700 lm hehkulamput on kuitenkin 60 W ja valotehokkuus vain 11,5 lm/W, joten ne poistuvat myynnistä 1.9.2011 jälkeen.

1.9.2012 (vaihe 4)

Tehokkuusvaatimukset

Vaiheen 4 alusta lähtien kaikkiin kirkkaisiin lamppuihin sovelletaan kaavaa 1, joka vaatii kaikilta kirkkailta lamputta vähintään energialuokan C energiatehokkuutta (ks. kappale 2.3.2). Käytännössä tämä koskee yhä myynnissä olevia 15 W, 25 W ja 40 W kirkkaita hehkulamppuja, joiden valotehokkuus ei yllä luokkaan C. 15-40 W hehkulamput poistuvat myynnistä 1.9.2012 jälkeen, jolloin myynnissä ei ole enää lainkaan hehkulamppuja, joiden valovirta on alle 60 lm.

1.9.2013 (vaihe 5)

Toimintavaatimukset

Vaiheen 5 alussa astuvat voimaan 2. toimintavaatimukset LED- ja pienloistelamputta. Uudet toimintavaatimukset parantavat lamppujen ominaisuuksia verrattuna 1. toimintavaatimukseen, jotka tulivat vaiheessa 1 voimaan. Toimintavaatimukset on esitetty kappaleessa 2.2.3.

1.9.2016 (vaihe 6)

Tehokkuusvaatimukset

Ekosuunnitteluvaatimusten vaiheittaisessa voimaansaattamisessa vaihe 6 on viimeinen askel. Himmeille lamppujen suurin sallittu mitoitus-teho määräytyy myös 6. vaiheen jälkeen kaavalla 2, joka tuli voimaan 1. vaiheessa ja vaatii himmeiltä lamputta luokan A energiatehokkuutta. Kaikille kirkkaille lamputta on 6. vaiheessa uusi, kovempi vaatimus. Suurin sallittu mitoitus-teho lasketaan 6. vaiheesta lähtien kaavalla 3:

$$P = 0,6 * (0,88\sqrt{\Phi} + 0,049\Phi) \quad (3)$$

Kaava vastaa energialuokan B vaatimustasoa (ks. kappale 2.3.2). Tämä tarkoittaa, että kaikkien kirkkaiden lamppujen on oltava 6. vaiheen voimaantulon jälkeen vähintään energialuokkaa B.

Käytännössä 6. vaihe vaikuttaa kierrekantaisiin energialuokan C halogeenilamputta, joita yhä on myynnissä vuonna 2016. Kaavan 3 avulla voidaan laskea, että 630 lm

(42W) C- halogeenin valotehokkuuden täytyisi 6. vaiheesta lähtien olla noin 20 lm/W. C- halogeenin valotehokkuus kuitenkin on vain 15 lm/W, joten ne poistuvat myynnistä 1.9.2016. Taulukossa 2.1 on yhteenveto eri vaiheissa voimaantulevista vaatimuksista.

Taulukko 2.1 Yhteenveto asetuksen 244 vaatimuksista.

	Energialuokkavaatimus					Vaikutusalue	Muut voimaantuvastavat vaatimukset
	Himmeä	Kirkas					
	>60 lm	>950 lm	>725 lm	>450 lm	>60 lm		
1.9.2009	A	C	-	-	-	Himmeät ja ≥ 100W kirkaat hehkulamput	1.toimintavaatimukset
1.9.2010	A	C	C	-	-	≥ 75W kirkaat hehkulamput	Tuotetietovaatimukset
1.9.2011	A	C	C	C	-	≥ 60W kirkaat hehkulamput	-
1.9.2012	A	C	C	C	C	15-40W kirkaat hehkulamput	
1.9.2013	A	C	C	C	C	-	2.toimintavaatimukset
1.9.2016	A	B	B	B	B	C- halogeenit	-

2.2.3 Toimintavaatimukset

Toimintavaatimuksia (taulukko 2.2) ovat lamppujen eloonjäämiskerroin 6000 h jälkeen, valovirran alenemakerroin, kytkentäjaksojen lukumäärä ennen vikaantumista, syttymisaika, lamppujen lämpenemisaika 60 %:iin valovirrasta, ennenaikainen vikaantumisaste, UVA, UVB ja UVC- säteily, lampun tehokerroin ja värintoistoindeksi (R_a). Toimintavaatimukset astuvat voimaan 1.9.2009. Toimintavaatimukseen tulee muutoksia 1.9.2013, jolloin muun muassa pienloistelamppujen syttymis- ja lämpenemisaikojen sekä valovirran aleneman suhteen astuu voimaan aiempaa kovemmat vaatimukset. (EY, 2009)

Taulukko 2.2 Asetuksen 244 toimintavaatimukset.

Toimintaparametri	Vaihe 1	Vaihe 5
Eloojäämiskerroin 6000h:ssa	≥ 0,50	≥ 0,70
Valovirran alenemakerroin	2000 h: ≥ 85% (≥ 80% kuvullisille)	≥ 2000 h: 88% (≥ 83% kvullisille) ≥ 6000 h: 70%
Kytkeäjaksojen lukumäärä ennen vikaantumista	≥ Puolet lampun eliniästä tunteina >10 000, jos syttymisaika > 0,3 s	≥ Lampun elinikä tunteina ≥ 30 000, jos syttymisaika > 0,3 s
Syttymisaika	< 2,0 s	< 1,5 s, jos teho < 10W < 1,0 s, jos teho ≥ 10W
Lämpenemisaika 60%:iin vakiintuneesta valovirrasta	< 60 s < 120 s amalgaamilamput	< 40 s < 100 s amalgaamilamput
Ennen aikainen vikaantumisaste	≤ 2,0 % 200 h:ssa	≤ 2,0 % 400 h:ssa
UVA + UVB-säteily	≤ 2,0 mW / klm	≤ 2,0 mW / klm
UVC-säteily	≤ 0,01 mW / klm	≤ 0,01 mW / klm
Tehokerroin	> 0,50, jos teho < 25W > 0,90, jos teho ≥ 25W	> 0,55, jos teho < 25W > 0,90, jos teho ≥ 25W
Värintoistoindeksi (R _a)	≥ 80	≥ 80

2.2.4 Tuotetietovaatimukset

Tuotetietovaatimukset liittyvät tietoihin, joiden on oltava vapaasti nähtävissä pakkauksessa ja vapaasti käytettävissä olevilla internetsivuilla. Tuotetietovaatimukset astuvat voimaan 1.9.2010 ja ne koskevat kaikkia lamppeja, jotka täyttävät vaiheen 4 tehokkuusvaatimukset. Tiedot, jotka 1.9.2010 jälkeen on oltava näkyvillä lampun pakkauksessa ovat: 1) Valovirta 2) Nimelliselinikä tunteina 3) Kytkeäjaksojen lukumäärä ennen lampun vikaantumista 4) Väriämpötila 5) Lämpenemisaika 60 %:iin täydestä valovirrasta 7) Varoitus, jos lamppea ei voi himmentää joillakin himmentimillä 8) Tiedot lampun optimaalisista käyttöolosuhteista, jos ne poikkeavat vakio-olosuhteista (kuten ympäristön lämpötila 25 °C) 9) Lampun mitat millimetreinä 10) Jos lampun väitetään vastaavan hehkulamppua väitetyn vastaavan hehkulampputehon on oltava taulukon 2.3 mukainen. (EY, 2009)

Taulukko 2.3 Korvaavien lamppujen valovirran vastaavuus hehkulamppuun tehoon.

Hehkulamppu teho [W]	Korvaavan lampun valovirta [lm]		
	Pienloistelamput	LED-lamput	Halogeenilamput
15	125	136	119
25	229	249	217
40	432	470	410
60	741	806	702
75	970	1055	920
100	1398	1521	1326
150	2253	2452	2137
200	3172	3452	3009

Taulukossa 2.3 esitetty korvaavan lampun valovirran vastaavuus hehkulamppuun perustuu asetuksen 244 taustaselvityksissä tehtyihin tutkimuksiin. Valmistajien on käytettävä taulukon lukemia vastaavuuksissaan 1.9.2010 lähtien. Taulukon vastaavuusarvot huomioivat lamppujen valovirran alenemisen polttoajan myötä. Ne eivät kuitenkaan huomioi pienloistelamppujen lämpenemis- ja syttymisviiveen eivätkä käyttö- ja ympäristöolojen vaikutusta LED- ja pienloistelamppujen valovirtaan, minkä

takia korvaavan lampputyypin valovirran olisi kenties hyvä olla jopa taulukon arvoja suurempi.

2.2.5 Markkinavalvonta

Asetuksen liitteestä 3 löytyy tarkastusmenettely markkinavalvontaa varten, jotta eri jäsenmaissa myytävät tuotteet täyttäisivät edellä esitetyt ekosuunnitteluvaatimukset. Tarkastusmenettelyn mukaan jäsenvaltioiden viranomaisten on testattava satunnaisotos, joka sisältää vähintään 20 saman mallin lamppua samalta valmistajalta. Mallin katsotaan täyttävän ekosuunnitteluvaatimukset, jos otoksen keskimääräisten testitulosten poikkeama enimmäis-, vähimmäis-, tai ilmoitettuihin arvoihin ei ylitä 10 %. Muussa tapauksessa mallin ei katsota täyttävän vaatimuksia. Mitattavat parametrit ovat lampun elohopeapitoisuus, lampun kannat, valotehokkuus, lampun elinikä, lampun syttymisaika ja lämpenemisaika. Mittausmenetelmien on oltava yleisesti parhaana pidettyjä, tarkkoja ja luotettavia.

2.3 Muut direktiivit

2.3.1 Ympäristödirektiivit RoHS ja WEEE

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/95/EY eli niin sanottu RoHS-direktiivi tietyjen aineiden rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkaa sisältävissä laitteissa rajoittaa elohopean määrää pienloistelampuissa. Direktiivi kieltää sellaisten tuotteiden myymisen EU:n alueella, jotka sisältävät elohopeaa. Poikkeuksena on direktiivin liitteessä lueteltu pienloistelamput, jotka sisältävät elohopeaa vähemmän kuin 5 mg. Näin ollen myynnissä olevissa pienloistelampuissa saa olla elohopeaa enintään 5 mg. (EY, 2002a)

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/96/EY eli niin sanottu WEEE-direktiivi koskee sähkö- ja elektroniikkaromua. Direktiivi muun muassa velvoittaa jäsenmaiden tuottajat osallistumaan sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätyksen rahoittamiseen. Lisäksi jäsenvaltiot velvoitetaan varmistamaan, että kuluttajat saavat riittävästi tietoa sähkö- ja elektroniikkaromussa olevista haitallisista aineista ja sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätyksestä. Jäsenvaltioiden on myös valvottava, että tuottajat merkitsevät sähkö- ja elektroniikkaromun selvästi, kuvan 2.1 mukaisesti. (EY, 2002b)



Kuva 2.1 Sähkö- ja elektroniikkaromusta käytetty merkintä.

WEEE- direktiivin tarkoitus on poistaa lamppujen ja muun käytetyn elektroniikan hävittämiseen ja kierrätykseen liittyvät ongelmat. WEEE- direktiivi velvoittaa lamppujen ja valaisimien valmistajat ottamaan käytetyt tuotteet kierrätystä varten takaisin. Vaikka monet lamppujen komponenteista voidaan kierrättää, kuluttajat eivät vie käytettyjä lamppujaan kierrätyspisteeseen. WEEE- direktiiviä laadittaessa tehdyn tutkimuksen mukaan vain 27,9 % kaikista lampuista kierrätetään. (Van Tichelen, Vercalsteren 2009)

2.3.2 Energiatohokkuusmerkintädirektiivi

Direktiivi 98/11/EY (EY, 1998) velvoittaa valmistajat tiedottamaan lamppujen energiatohokkuudesta yhdenmukaisesti direktiivin määrittelemällä tavalla. Direktiivi jakaa lamput luokkiin A-E energiatohokkuusjärjestyksessä. Lampun energialuokka riippuu sekä valovirrasta (Φ) että tehosta (P). Lamppu kuuluu energialuokkaan A, jos lampun teho P noudattaa seuraavaa yhtälöä.

$$P \leq 0,24\sqrt{\Phi} + 0,0103\Phi \quad (4)$$

Jos yhtälö 4 ei toteudu, lamppu ei kuulu energialuokkaan A. Tällöin lasketaan energiatohokkuusindeksi E_t seuraavasti:

$$E = P / P_R \quad (5)$$

Kaavassa 5 P_R lasketaan kaavan 6 mukaan:

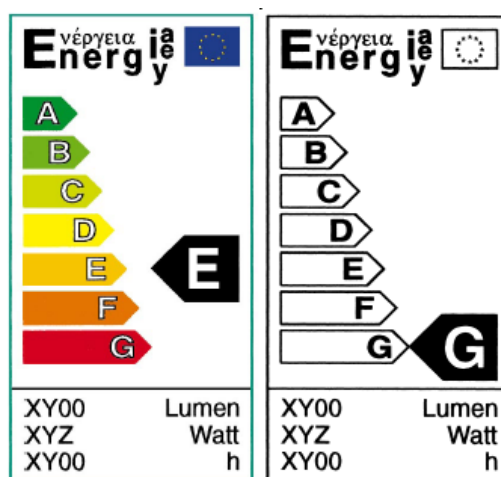
$$P_R = 0,88\sqrt{\Phi} + 0,049\Phi \quad (6)$$

Lampun energialuokka B-G määrittyy nyt energiatohokkuusindeksistä taulukon 2.4 mukaan.

Taulukko 2.4 Energialuokan määrittäminen energiatohokkuusindeksistä.

Energialuokka	Energiatohokkuusindeksi E_l
B	$E_l < 60\%$
C	$60\% \leq E_l < 80\%$
D	$80\% \leq E_l < 95\%$
E	$95\% \leq E_l < 110\%$
F	$110\% \leq E_l < 130\%$
G	$E_l \geq 130\%$

Energialuokkadirektiivi velvoittaa valmistajia ilmoittamaan lamppujen energiatohokkuuden yhdenmukaisesti. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että lamppujen pakkauksessa on oltava kuvan 2.2 mukainen energiatohokkuusmerkintä. Jos lampun elinikä, valovirta ja teho on esitetty muualla pakkauksessa, voi ne jättää pois merkinnästä. (EY, 1998)



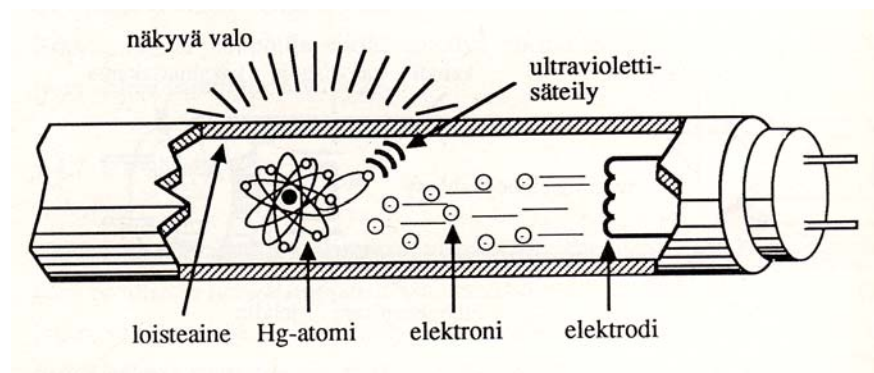
Kuva 2.2 Energiatohokkuusmerkintä.

3 Lamppujen tekniikka

3.1 Pienloistelamppu

3.1.1 Loistelampun toimintaperiaate

Kaikkien loistelamppujen toiminta perustuu purkausputken sisään synnyttävään kaasupurkaukseen. Kaasupurkauksessa liikkuvat elektronit törmäävät elohopea-atomeihin ja virittävät niitä. Elohopea-atomien viritystilan purkautuessa perustilalle ne säteilevät resonanssitaajuudella. Tämän säteilyn aallonpituus on 253,7 nm ja se on UV-alueella. Elohopean resonanssisäteilyn lisäksi kaasupurkauksessa syntyy myös muita taajuuksia. Näkyvää valoa syntyvästä säteilystä on 10 %. Varsinainen valontuotto tapahtuu kuitenkin resonanssitaajuuden avulla, kun UV-alueen resonanssisäteily virittää purkausputken sisäpinnassa olevan loisteainekerroksen atomeja, jolloin vapautuu näkyvää valoa. (kuva 3.1) (Halonen, Lehtovaara, 1992)



Kuva 3.1 Loistelampun toimintaperiaate. (Halonen, Lehtovaara, 1992)

Loistelamppu on täytetty 200-600 Pa:n paineisella jalokaasulla, kuten argon tai krypton. Elohopeahöyryn paine lampun toimintalämpötilassa on vain 1,3 Pa. Tässä paineessa resonanssitaajuuden osuus elohopeahöyryn synnyttämästä säteilystä on suurimmillaan. Jalokaasutäytös ei vaikuta säteilyyn, vaan moniin muihin toimintoihin, kuten syttymiseen ja elektrodien kulumisen kautta polttoikään. Jalokaasun paine vaikuttaa seuraavasti: liian suuri paine vaikeuttaa lampun syttymistä ja pienentää valovirtaa, mutta vähentää elektrodien kulumista, liian pieni paine vaikuttaa päinvastaisesti. Jalokaasutäytöksen paine on kompromissi polttoian ja syttymisominaisuuksien välillä. (Cayless, Marsden, 1983)

Loistelampun valotehokkuuteen vaikuttavat lähinnä seuraavat tekijät. 1) Loisteaine muuttaa tehokkaimmin säteilyä valoksi elohopean resonanssitaajuudella 253,7 nm, minkä vuoksi elohopeahöyryn paineella ja tiheydellä on merkittävästi vaikutusta lampun valotehokkuuteen. Elohopeahöyryn tiheyden ylittäessä optimaalisen arvon säteilyn spektrijakauma muuttuu säteilyn siirtyessä korkeammille aallonpituuksille, ja resonanssitaajuuden osuus säteilystä vähenee. Myös tiheyden lasku alle optimaalisen vähentää resonanssitaajuuden määrää. 2) Kaasupurkauksen virtatiheyden (A/cm^2) suuretsa säteilemättömien ionien lukumäärä kasvaa, mikä vähentää elohopeahöyryn säteilyn kokonaismäärää. 3) Loisteaineen kyvyllä muuttaa UV-alueen säteily näkyvän valon alueelle on merkittävästi vaikutusta valotehokkuuteen. Loisteaineen kunto heikkenee vähitellen erityisesti hyvin lyhytaaltoisen 185 nm:n UV-säteilyn vuoksi. 4) Purkausputken dimensiot. Kuvun seinämän on oltava riittävän lähellä purkauskanavaa, että elohopea-atomien lähettämä UV-säteily ei ehtisi absorboitua ennen loisteaineeseen saapumista. 5) Myös lampun liitäntälaite aiheuttaa jonkin verran häviöitä. (Halonen, Lehtovaara, 1992)

3.1.2 Syttyminen

Verkkojännite ei yleensä yksinään riitä synnyttämään purkausputkeen kaasupurkausta ja käynnistämään valontuottoa ja kestää jonkin aikaa ennen kuin vapaiden elektronien lukumäärä on riittävä kasvattamaan virtaa purkausputkessa. Lisäksi syttymiseen vaikuttaa merkittävästi ympäristön lämpötila. Loistelampun syttymisjännite on pienimmillään +20 °C:een lämpötilassa. Syttymisjännite nousee jyrkimmin +5 °C:een alapuolella ja +60°C:en yläpuolella. Syttymistä matalissa lämpötiloissa on mahdollista helpottaa vähentämällä jalokaasutäytöksen painetta tai käyttämällä erillistä elektrodia, jonka tarkoitus on tuottaa lämpöä. Sammuttaminen ei pienen elohopeahöyryn paineen vuoksi lisää loistelampun syttymiseen tarvittavaa jännitettä, joten loistelamppu syttyy heti sammuttamisen jälkeen uudelleen. (Halonen, Lehtovaara, 1992)

Loistelampun syttyminen normaalilla käyttöjännitteellä edellyttää, että elektrodeja lämmitetään ennen sytyttämistä, mikä hidastaa lampun syttymistä ja vaatii erillisen sytyttimen käyttöä. Pienloistelamppujen sytyttäminen ei kuitenkaan vaadi erillistä sytyttimen hankkimista, vaan lampun kannassa oleva liitántalaite huolehtii elektrodien lämmittämisestä. Joissakin pienloistelampuissa syttymistä on nopeutettu kasvattamalla sytytysjännitettä, jolloin elektrodeja ei tarvitse lämmittää yhtä korkeaan lämpötilaan kuin alhaisemmalla sytytysjännitteellä. Korkea jännite kuitenkin kuluttaa elektrodeja enemmän, mikä lyhentää lampun elinikää.

3.1.3 Lämpeneminen

Pienloistelamppu ei syttymisen jälkeen tuota täyttä valovirtaa, vaan kestää jonkin aikaa ennen kuin lamppu on lämmennyt ja elohopea höyrystynyt lopulliseen paineeseensa. Lämpenemisaika voi olla useita minutteja ja tämän aikana lampun valovirta nousee. Amalgaamitekniikan käyttö parantaa pienloistelampun suorituskykyä, kun lämpötilaolosuhteet eivät ole optimaaliset. Elohopeaa amalgaamimuodossa sisältävien lamppujen lämpenemisajat ovat kuitenkin yleensä pitempiä kuin tavanomaisten pienloistelamppujen.

3.1.4 Ympäristön lämpötilan ja polttoasennon vaikutus valovirtaan

Pienloistelampun valovirta riippuu voimakkaasti elohopeahöyryn paineesta. Elohopeahöyryn paine ja tiheys määräytyvät purkausputken kylmimmän pisteen lämpötilan mukaan. Valontuoton kannalta optimaalisin kylmäpisteen lämpötila on 42 °C, mikä vastaa ympäristön lämpötilaa 25 °C. Tämän vuoksi pienloistelampun valovirta laskee huomattavasti asennettaessa lamppu ulos. Valovirta voi laskea myös asennettaessa purkausputki kuvun tai valaisimen sisään. (Cayless, Marsden, 1983)

Tavanomaisen pienloistelampun valovirran aleneminen suljetussa valaisimessa on ongelma vain huoneenlämpötilassa. Jos valaisin on kylmässä ulkolämpötilassa, suljettu valaisin vaikuttaa pienloistelampun valovirtaan päinvastoin kuin sisälämpötilassa nostaa pienloistelampun valontuottoa. Tavanomaisen pienloistelampun valovirta tippuu lämpötilan ollessa matala. Suljetussa valaisimessa lamppu kuitenkin lämmittää valaisimen sisäilmaa, jolloin lämpö ei pääse haihtumaan. Sen vuoksi suljettu valaisin parantaa ulkokäytössä pienloistelampun suorituskykyä. Taulukossa 3.1 näkyy ympäristön lämpötilan vaikutus lampun suorituskykyyn, kun lamppu on suljetussa valaisimessa. (Laperriere, Martel 1993). Arvot ovat suhteessa huoneenlämpötilassa (25 °C) saatavaan valaistuvoimakkuuteen. Taulukosta nähdään, että lampun tehon kasvaessa suhteellinen valaistusvoimakkuus kasvaa. Kuitenkin ympäristön lämpötilan laskiessa -30 °C:een myös tehokkaiden lamppujen valaistusvoimakkuus laskee 2x13 watin valaisinta lukuun ottamatta.

Taulukko 3.1 Lämpötilan vaikutus pienloistelampun valovirtaan suljetussa valaisimessa. (Laperriere, Martel 1993)

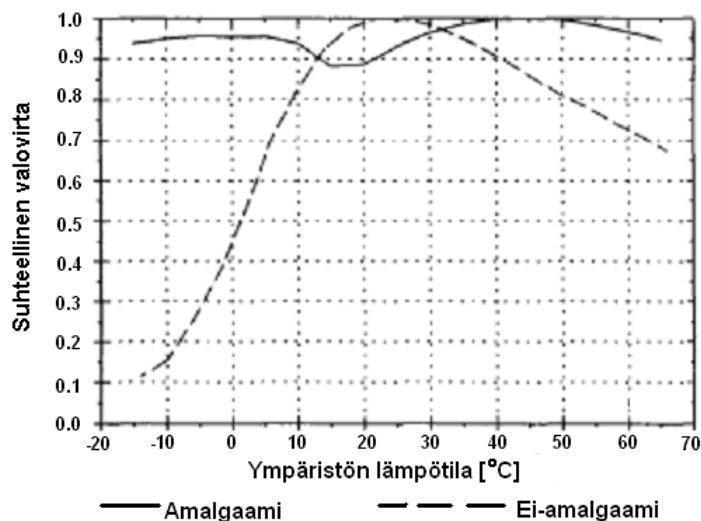
Teho [W]	Ympäristön lämpötila [°C]				
	25	10	0	-10	-30
13	1,00	1,30	1,31	1,13	
2x13	1,00	1,17	1,28	1,41	1,37
2x9	1,00	1,10	1,03	0,68	0,13
22	1,00	1,16	1,14	0,98	0,21
7	1,00	0,96	0,42	1,17	0,05
2x7	1,00	0,79	0,36	0,16	0,02
28	1,00	1,13	1,23	1,18	0,32

Pienloistelampun valovirta on suurin kanta ylöspäin polttoasennossa. Kotitalouksissa on suuri joukko valaisimia (kuten kattokruunut ja seinäkyntteliköt), joissa lamppua poltetaan kanta alaspäin. Kanta alaspäin polttoasennossa lämpö nousee ylöspäin nostaen siten purkausputken päässä sijaitsevan kylmäpisteen lämpötilaa. Tämän vuoksi pienloistelampun valovirta on kanta alaspäin polttoasennossa alempi kuin kanta ylöspäin polttoasennossa. Vuonna 1991 tehdyn tutkimuksen mukaan valovirta voi kanta alaspäin polttoasennossa olla 5-17 % alempi kuin kanta ylöspäin polttoasennossa. (Tetri, Halonen, 1991). Ongelman kuitenkin ratkaisevat amalgaamitekniikkaan perustuvat pienloistelamput, joiden valovirta ei ole yhtä riippuvainen purkausputken kylmäpisteen lämpötilasta.

3.1.5 Amalgaamilamput

Kuten on jo mainittu, pienloistelampun valovirta on riippuvainen lampun kylmimmän pisteen lämpötilasta ollen suurimmillaan kylmäpisteen lämpötilassa 42 °C ympäristönlämpötilan ollessa tällöin 25 °C. Monissa käyttötarkoituksissa (kuten tavanomaisesta kanta ylöspäin poikkeavat polttoasennot, suljetut valaisimet ja ulkolämpötilat) kylmäpisteen lämpötila poikkeaa optimiarvostaan.

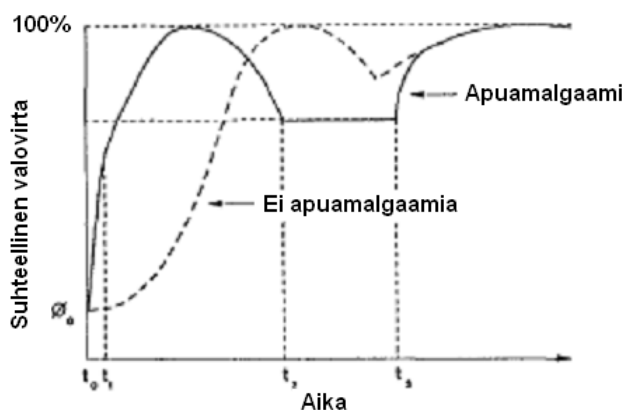
Amalgaamitekniikkaan perustuvat pienloistelamput eivät ole yhtä riippuvaisia kylmäpisteen lämpötilasta. (kuva 3.2) Amalgaamilampuissa elohopea on sekoitettu johonkin toiseen metalliin, kuten indiumiin tai vismuttiin, jonka kanssa se muodostaa amalgaamin. Tavanomaisen pienloistelampun valovirta laskee purkausputken kylmimmän pisteen lämpötilan ylittäessä 40 °C, koska elohopeahöyryn paine nousee liikaa. Amalgaami absorboi elohopeaa kaasupurkauksesta kylmimmän pisteen lämpötilan ylittäessä 40 °C. Amalgaamitekniikkaan perustuvien pienloistelamppujen optimaalinen kylmäpisteen lämpötila on 60 °C. (Cayless, Marsden, 1983)



Kuva 3.2 Amalgaami- ja tavanomaisen pienloistelampun valontuoton riippuvuus ympäristön lämpötilasta. (Serres, Taelman, 1993)

Suurin haitta amalgaamitekniikan käytössä kuitenkin on huomattavasti hitaampi valovirran nousu syttymishetken jälkeen. Amalgaamilamppujen hitaampi lämpeneminen johtuu siitä, että elohopeahöyryn paine purkausputkessa lampun ollessa kylmä on amalgaamilampulla huoneenlämpötilassa huomattavasti alempi kuin ei-amalgaamilampulla. Alhaisen paineen vuoksi lampun valovirta on käynnistytksen jälkeen alempi ja valovirran nousu amalgaamin ja lampun lämmitessä hitaampaa. Kuitenkin myös amalgaamilamppujen väliset erot voivat olla suuria johtuen eri tavoista, joilla amalgaamitekniikka on lampussa toteutettu. (Serres, Taelman, 1993)

Erityisen apuamalgaamin käyttö nopeuttaa amalgaamilampun lämpenemistä huomattavasti (kuva 3.3). Apuamalgaamin käyttö perustuu sen kykyyn vapauttaa elohopeahöyryä purkaukseen nopeasti lampun käynnistymisen jälkeen. Apuamalgaami sijaitsee yleensä lähellä elektrodia, jotta se lämpenisi nopeammin. Kun apuamalgaami on nostanut painetta purkausputkessa, lampun kylmimmän pisteen lämpötila nousee muutamassa minuutissa optimiarvoonsa 42 °C, jolloin valovirta on suurimmillaan. Kylmimmän pisteen lämpötilan noustessa tästä edelleen valovirta lähtee laskuun, koska paine purkausputkessa on liian suuri. Tällöin pääamalgaami alkaa absorboida elohopeaa purkauksesta, jolloin paine laskee ja valovirta lähtee jälleen nousuun. Lampun lopullinen valovirta riippuu pääamalgaamin lämpötilasta ja koostumuksesta. (Serres, Taelman, 1993)



Kuva 3.3 Apuamalgaamitekniikan perustuvan pienloistelampun lämpeneminen verrattuna amalgaamilamppuun, jossa ei käytetä apuamalgaamia. (Serres, Taelman, 1993)

3.1.6 Valovirran alenema ja käyttöikä

Loistelampun valovirta yleensä laskee käytön myötä johtuen erilaisten yhdisteiden muodostumisesta loisteainekerroksen eteen. Lisäksi erityisesti hyvin lyhytaaltainen 185 nm:n UV-säteily heikentää vähitellen loisteaineen tehokkuutta. Valovirran alenema on suurin ensimmäisten 100 h aikana, minkä jälkeen myös ensimmäiset mittaukset yleensä tehdään. Valmistajat ilmoittavat lamppujensa arvot yleensä 100 h vanhennuksen jälkeen tehdyn mittauksen mukaan. Loistelampun taloudellinen käyttöikä on yleensä 6000-15000 h. Loistelamppu voi myös rikkoutua ennen kuin taloudellinen käyttöikä päättyy. Rikkoutuminen johtuu useimmiten lampun elektrodien emissioaineen kulumisesta loppuun ja ilmenee siten, että lamppu ei enää syty. Lämmittämällä elektroledeja ennen sytyttämistä on mahdollista vähentää elektrodien kulumista, minkä vuoksi liitäntälaitteella on suuri merkitys käyttöiän kannalta. Elektrodien kulumista vähentävät myös korkea täytöskaasun paine ja sytytystiheyden harventaminen. (Halonen, Lehtovaara, 1992)

3.1.7 Pienloistelampputyypit

Kierrekantaiset (E14 ja E27) pienloistelamput voidaan jakaa purkausputken ulkomuodon mukaan sauvamaisiin ja kierteisiin lamppuihin. Lisäksi kolmas päätyyppi

ovat kuvalliset pienloistelamput, joissa ulkokuori ympäröi purkausputkea. Kuvassa 3.4 on pienloistelamppujen päätyypit.



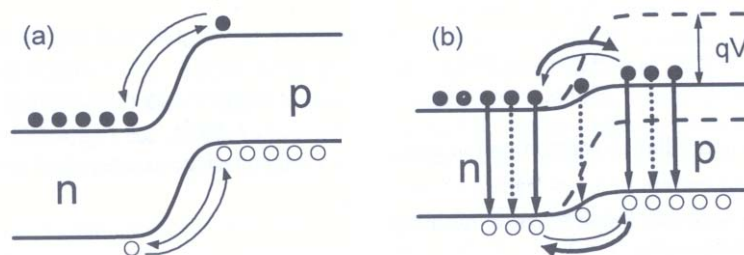
3.4 Osram- valmistajan sauvamainen, kierteinen ja kuvallinen pienloistelamppu.

Sauvamaaisissa pienloistelampuissa purkausputki muodostuu useista yhteen liitetystä sauvoista. Näin saadaan kasvatettua purkausputken pituutta ja lampun tehoa. Huono puoli usean purkausputken yhteen liittämiseksi on, että lampun valotehokkuutta heikentää hieman purkausputkiin absorboituva valo. Sauvamaiset pienloistelamput voidaan edelleen jakaa sauvojen lukumäärän mukaan. Toinen tapa kasvattaa purkausputken tehoa ja pituutta on taivuttaa purkausputki spiraaliksi, kuten kierteisessä pienloistelampussa. Tällöin purkausputki muodostuu yhtenäisestä purkauskanavasta.

3.2 LED- lamppu

3.2.1 LED:n toimintaperiaate

LED on puolijohdekomponentti, jossa erimerkkisten varauksenkuljettajien rekombinoituminen synnyttää lähes monokromaattista säteilyä, joka voidaan eri tavoin muuntaa näkyvän valon alueelle. LED muodostuu yksinkertaisimmillaan kahden puolijohteen liitoksesta. Näitä puolijohteita sanotaan n- ja p-tyypin puolijohteiksi. N-tyypin puolijohdeessa enemmistövarauksenkuljettajat ovat elektroneja, kun taas p-tyypin puolijohdeessa varauksenkuljettajat ovat aukkoja eli atomeja, joilla on yhden elektronin vaje uloimmalla kuorellaan. Elektronit kulkeutuvat diffuusion vaikutuksesta p-n-liitoksen yli p-tyypin puolijohdeeseen, jossa ne rekombinoituvat aukkojen kanssa. Vastaavasti aukot kulkeutuvat n-tyypin puolijohdeeseen ja rekombinoituvat elektronien kanssa. Kulkeutuminen synnyttää liitokseen tyhjennysalueen, jossa ei ole lainkaan varauksenkuljettajia, ja jonka yli liitoksen molemmiin puolin olevat elektronit ja aukot muodostavat diffuusiojännitteen. (kuva 3.5a) Diffuusiojännite (V) edustaa estettä, joka elektronien (aukkojen) on ylitettävä päästäkseen p-n-liitoksen yli ja rekombinoituaan aukkojen (elektronien) kanssa. Kun LED:in yli kytkettävä jännite ylittää kynnysarvon, joka on diffuusiojännitteen suuruinen, elektronit (aukot) rekombinoituvat aukkojen (elektronien) kanssa (kuva 3.5b) ja LED säteilee lähes monokromaattista säteilyä, jonka aallonpituus riippuu rekombinoitumisesta vapautuvasta energiamäärästä.



Kuva 3.5 Elektronien rekombinoituminen aukkojen kanssa, kun LED-komponentin yli kytketään myötäsuurinen jännite. (Gaska, Shur, 2002)

3.2.2 Väriominaisuudet

Elektronien ja aukkojen rekombinaation synnyttämän säteilyn aallonpituus, eli LED:n säteilemän valon väri, riippuu rekombinaatiossa vapautuvasta energiamäärästä. Rekombinaatiossa vapautuva energiamäärä on elektronien ja aukkojen energioiden erotuksen suuruinen. Elektronien ja aukkojen sallitut energiatilat määräytyvät p-n-liitoksessa käytettyjen materiaalien mukaan. Esimerkiksi alkuaineista gallium(Ga), indium(In) ja typpi(N) muodostuva GaInN p-n-liitos säteilee seostuksesta riippuen 470 nm:n tai 525 nm:n aallonpituutta, jotka vastaavat sinistä ja vihreää väriä. (Schubert, 2003)

Värintoistoindeksi (R_a)

LED:n värintoistoindeksi riippuu valkoisen valon synnyttämiseen käytetystä menetelmästä. Valkoista valoa voidaan synnyttää kolmella eri menetelmällä: 1) Yhdistämällä punaista, vihreää ja sinistä väriä tuottavien LEDien säteilyä oikeissa suhteissa säätämällä kunkin LED:n intensiteettiä. Menetelmällä saatu värintoistoindeksi on kuitenkin usein heikko ($R_a = 60-85$), (Schubert, 2003) joten menetelmää ei yleensä käytetä. 2) Yhdistämällä sininen ja keltainen valo, jotka saadaan lyhytaaltoista säteilyä synnyttävän LED:n ja siitä keltaista valoa synnyttävän loisteaineen avulla. Menetelmällä saatu valkoisen valon spektri sisältää kapean sinisen huipun ja hieman leveämmän keltaisen huipun. Menetelmällä on mahdollista saada hyvä värintoistoindeksi ($R_a = 55-85$). (Schubert, 2003) 3) Muuttamalla menetelmää 2 siten, että lyhytaaltainen sininen LED korvataan vielä lyhytaaltoisemmalla UV-LED:llä.

Värilämpötila (CCT)

LED:n värilämpötila riippuu suuresti menetelmästä, jolla valkoinen valo synnytetään LED:n säteilemästä lähes monokromaattisesta säteilystä. Usein käytetty menetelmä on yhdistää sinisen LED:n säteily ja siitä keltaista valoa synnyttävän loisteaineen säteily. Yleensä lopulliseen spektriin jää silloin huomattava määrä sinistä ja keltaista komponenttia suhteessa muiden värien määrään, minkä vuoksi valkoisen LED:n valon väri on hyvin usein hieman sinertävä. Sinertävän värinen valo on värilämpötilaltaan yleensä jonkin verran korkeampi kuin 3000 K ja sävyltään kylmä.

3.2.3 Lämpeneminen ja lämpötilan vaikutus ominaisuuksiin

LED:n valovirta ja valotehokkuus riippuvat suuresti liitoksen lämpötilasta. LED tuottaa heti käynnistymisen jälkeen täyden valovirran, minkä jälkeen valovirta alenee liitoksen lämmitessä. Valovirran aleneman lisäksi lämpötilan nousu myös muuttaa LED:n säteilemän valon väriä hieman. LED:n liitoksen lämpötila nousee aluksi johtuen LED:n kuluttaman tehon noususta, mutta sen jälkeen liitoksen lämpötilaa hallitsee ympäristöolosuhteet. LED:n valovirta laskee käynnistymisen jälkeen seuraavista syistä:

1. LED:n virran kasvusta johtuva valovirran lasku

LED:n synnyttämä säteily riippuu myötävirrasta ja -jännitteestä, johon lämpötilan nousu voimakkaasti vaikuttaa. Vakiovirralla ajettaessa myötäjännite stabiloituu p-n -liitoksen lämpötilan stabiloituessa. Kun LED käynnistetään, liitoksen lämpötila nousee LED:n kuluttaman tehon takia, jonka jälkeen lämpötila stabiloituu. Myötäjännitteen voimakkaan lämpötilariippuvuuden takia LED:n säteily ei stabiloidu ennen kuin terminen tasapaino on saavutettu. LED:n lämpötilan ja säteilyn stabiloituminen voi kestää useita minutteja, minkä aikana LED:n valovirta laskee jonkin verran. Lisäksi LED:n spektrin hallitseva aallonpituus siirtyy hieman stabiloitumisen aikana, minkä takia LED:n valon väri hieman muuttuu. (Labsphere, 2010)

2. Ympäristön lämpötilan nousun aiheuttama valovirran lasku

Kun terminen tasapaino on saavutettu, liitoksen lämpötilaa hallitsee lämmönsiirto liitoksesta ympäristöön, mihin vaikuttaa suuresti LED:n lämmönpoiston toteutus. Kun LED:n teho on stabiloitunut, riippuu LED:n valovirta ympäristön lämpötilasta. Jos

ympäristön lämpötila nousee LED:n valovirta laskee, LED:n spektri muuttuu hieman ja sen hallitseva aallonpituus siirtyy yleensä noin 0.1-0.3 nm/K. Esimerkiksi suljetussa valaisimessa LED- lamppu lämmittää valaisimen sisäilmaa, mistä johtuen LED:n valovirta laskee ja väri muuttuu hieman. (Labsphere, 2010).

3.2.4 Optiset ominaisuudet

Säteilyn absorboituminen ja kokonaisheijastus puolijohteen rajapinnalta

Osa LED:n synnyttämästä säteilystä ei koskaan pääse ulos puolijohderakenteesta, vaan muuttuu erinäisistä syistä johtuen lämmöksi. Metallikontaktit ja substraatti voivat absorboida osan valosta. Lisäksi puolijohdemateriaalin ja ilman välisellä rajalla voi tapahtua kokonaisheijastus, jolloin osa valosta jää puolijohteeseen. Kokonaisheijastumista voidaan vähentää koteloimalla LED epoksikoteloon, jonka taitekerroin on suurempi kuin puolijohteen, mutta pienempi kuin ilman Kokonaisheijastus voi edelleen tapahtua kotelon ja ilman välisellä rajapinnalla, mutta se voidaan estää puolipallon muotoisella kotelo-ilmarajapinnalla. (Schubert, 2003)

LED:n valonjako

Ulospääsevä osa säteilystä on yleensä suuntautunut melko kapealle keilanleveydelle johtuen puolijohteen ja kotelon ja kotelon ja ilman välisistä taitekerroineroista, jotka johtavat valonsäteiden taittumiseen kyseisillä rajapinnoilla. Olettaen, että puolijohdetta ei ole koteloitu eli ympäröivä materiaali on ilmaa, on tasomaisen puolijohteen synnyttämä säteilykuvio tasajakoinen eli ympyrän muotoinen. Säteilyn intensiteetti on tällöin voimakkaimmillaan kohtisuoraan eteenpäin ja heikkenee reunoille päin. (Schubert, 2003)

Puolijohteen koteloimisella puolipallon muotoiseen epoksikoteloon on kolme etua: 1) Puolijohteen ympärillä oleva epoksikotelo vähentää kokonaisheijastusta puolijohdekotelorajapinnalla. 2) Puolipallonmuotoinen kotelo-ilmarajapinta estää kokonaisheijastuksen kyseisellä rajapinnalla. 3) Kotelo toimii myös linssinä, koska epoksikotelon puolipallon muotoinen ilmarajapinta levittää hieman LED:n säteilykuvioita.

Värilämpötilan muuttuminen säteilykulman mukaan

Säteilykuvion muodon lisäksi LEDien optiikkaan liittyy eräs erityispiirre, minkä takia LED:n värilämpötila muuttuu hieman säteilykulman mukaan. Tämä johtuu siitä, että loisteainekerroksen paksuus vaikuttaa valon aallonpituuteen: 1) Jos puolijohteen yläpuolella oleva loisteainekerros on yhtä paksu koko puolijohteen alueella ja puolijohteen suuntainen, kulkee kerrokseen kohtisuoraan saapuva säteily lyhyemmän matkan kerroksen läpi. Kohtisuoraan kerroksen läpi kulkeneen säteilyn spektrissä on silloin suurempi osuus puolijohteen synnyttämää sinistä säteilyä, ja LED:n valon värilämpötila korkeampi ja sävy kylmempi. 2) Jos loisteainekerros on puolipallon muotoinen, kulkee puolijohteeseen nähden kohtisuora säteily pitemmän matkan loisteainekerroksessa, jolloin kohtisuora säteily sisältää vähemmän alkuperäistä sinistä komponenttia ja sen värilämpötila on matalampi. (Mottier, 2009)

3.3 Halogeenilamppu

3.3.1 Energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät

Halogeenilamppujen energiatehokkuus riippuu lampun tehosta siten, että tehon kasvaessa myös energiatehokkuus paranee. Tämän vuoksi valmistajien tuotevalikoimissa yleensä tuoteperheen tehokkaimmat mallit ovat energiatehokkaampia kuin vähemmän tehoa kuluttavat. Halogeenilampun energiatehokkuus riippuu tehon lisäksi useista muistakin tekijöistä, joten sitä voidaan parantaa monin keinoin.

Ympärisäteilevän halogeenilampun energiatehokkuutta on mahdollista parantaa vähentämällä lämpöhäviöitä käyttämällä huonommin lämpöä johtavaa täytekaasua. Esimerkiksi xenon-kaasua käyttämällä on mahdollista parantaa vaihtojännitelampun energiatehokkuutta 20 %. Toinen keino on käyttää infrapunasäteilyä heijastavaa materiaalia, josta näkyvä valo pääsee läpi, mutta infrapunasäteily heijastuu takaisin hehkulankaan. Menetelmä parantaa energiatehokkuutta 40 %. Ongelmana kuitenkin on se, että korkean 230 V:n jännitteen takia hehkulangan on oltava verraten pitkä, mistä johtuen infrapunasäteilyä on vaikea heijastaa siihen takaisin. Tämän takia menetelmä soveltuu vain pienjännitehalogeenilampuille. Kolmas menetelmä, joka mahdollistaa edellisen menetelmän käytön 230 V:n verkkojännitteellä, on käyttää verkkojännitteen muuntajaa infrapunasäteilyä heijastavalla materiaalilla päällystetyn pienjännitteisen halogeenilampun kanssa. (Van Tichelen, Vercalsteren 2009)

3.3.2 Korvaavat halogeenilampputyypit

Xenon-kaasulla täytetyt halogeenilamput (C-luokka)

Kuten edellä kerrottiin, käyttämällä xenon-kaasua halogeenilampun täytekaasuna on mahdollista parantaa halogeenilampun energiatehokkuutta merkittävästi. Tällä tekniikalla on mahdollista valmistaa 20-30 % hehkulamppua energiatehokkaampia halogeenilamppuja. Kyseiset lamput kuuluvat energialuokkaan C. Xenon-kaasulla täytettyjä halogeenilamppuja löytyy markkinoilta pien- ja verkkojännitteelle. (Van Tichelen, Vercalsteren 2009)

Infrapunapinnoitteiset halogeenilamput (B-luokka)

Päällystämällä halogeenilamppu infrapunakerroksella on mahdollista valmistaa halogeenilamppuja, joiden energiatehokkuus ylittää energialuokkaan B. Tätä tekniikka on mahdollista käyttää pienjännitteiselle halogeenilampulle, mutta verkkojännitteinen halogeenilamppu tarvitsee muuntajan. Muuntaja on usein sisäänrakennettu verkkojännitteiseen halogeenilamppuun. Halogeenilampun tuottama lämpö kuitenkin vaikuttaa tällöin muuntajan toimintaan, joten sisäänrakennetulla muuntajalla varustettuja halogeenilamppuja ei ole suurimmille tehoille. Tämän vuoksi luokan B verkkojännitteellä toimivista halogeenilampuista ei löydy yli 60 W hehkulamppua vastaavaa tuotetta. (Van Tichelen, Vercalsteren 2009)

3.4 Korvaavien lamppujen liitäntälaitteet

3.4.1 Pienloistelampun sähköiset ominaisuudet

Loistelampun liitäntälaitteen tärkein tehtävä on estää virran kasvu kaaripurkauksessa. Kaaripurkauksessa virran kasvu on niin voimakasta, että se sulattaisi lampun johdikkeet, ellei sitä rajoitettaisi jotenkin. Tämä on toteutettu kierrekantaisissa pienloistelampuissa elektronisesti. Elektronisella liitäntälaitteella on lukuisia etuja tavanomaisiin virranrajoitusmenetelmiin nähden. Elektronisen liitäntälaitteen etuna on muun muassa energiatehokkuus. Loistelamppu toimii lähes 20 % energiatehokkaammin 20 kHz:n kuin 50 Hz:n taajuudella. (Cayless, Marsden, 1983) Elektroninen liitäntälaitte onkin olennaisesti taajuusmuunnin, joka muuntaa ottamansa 50 Hz:n taajuuden jännitteen ensin tasajännitteeksi ja sitten alkuperäistä huomattavasti suuremmalle taajuudelle.

Elektroninen liitäntälaitte voi myös vaikuttaa pienloistelampun elinikään. Liitäntälaitte voidaan rakentaa lämmittämään elektrodeja ennen lampun sytyttämistä ja siten pidentää niiden elinikää. Elektrodien kulumisen estämisen kannalta on tärkeää, että lampun sytyttämisessä ei jouduta käyttämään liian korkeaa jännitettä, koska korkea jännite kuluttaa niiden emissioainetta ja lyhentää elinikää. Syttymisen vaatimaa jännitettä voidaan alentaa lämmittämällä elektrodeja sähkövirran avulla. Lämmittäminen on kuitenkin hitaampi keino synnyttää kaasupurkaus kuin korkean sytytysjännitteen käyttäminen. Lamppujen erot syttymisajoissa liittyvät hyvin usein juuri elektrodien lämmittämiseen käytettyyn aikaan.

3.4.2 LED:n sähköiset ominaisuudet

LED:n läpi ei kulje virtaa, jos sen yli oleva myötasuuntainen (p-n-suuntainen) jännite on alle kynnysarvon. Virta ei myöskään kulje, jos jännite on estosuuntainen (n-p-suuntainen). LED johtaa, kun sen yli oleva myötasuuntainen jännite ylittää kynnysjännitteen. LED:n virta riippuu jännitteestä eksponentiaalisesti, mikä tarkoittaa sitä, että virta kasvaa hyvin voimakkaasti jännitteen ylittäessä kynnysarvon ja pienikin muutos jännitteessä aiheuttaa suuren muutoksen virrassa. Virran voimakkaan jänniteriippuvuuden vuoksi virtaa on rajoitettava. Mikäli LED kytketään vakiojännitelähteeseen, virtaa voidaan rajoittaa esimerkiksi sarjaan kytkettävän vastuksen avulla. Yleensä kuitenkin käytetään jännitelähteen sijaan vakiovirtalähdettä, joka voidaan toteuttaa esimerkiksi elektronisesti transistorien avulla. (Schubert 2003) LED- lampuissa virranrajoitus on sisäänrakennettu lampun rakenteeseen ja toteutettu elektronisesti.

3.4.3 LED- ja pienloistelampun tehokerroin

Perinteiseen magneettiseen kuristimeen perustuvan loistelampun liitäntälaitteen tehokerroin on usein huono johtuen virran ja jännitteen välille syntyvästä vaihe-erosta, joka voidaan korjata kapasitanssin avulla. Sekä LED- että pienloistelampun elektronisen liitäntälaitteen tehokerroin on yleensä myös huono, mutta eri syystä. Elektronisen liitäntälaitteen taajuusmuuntimen takia virran käyrämuoto poikkeaa yleensä huomattavasti sinimuotoisesta, mikä tarkoittaa, että virrassa on perusaallon lisäksi huomattava määrä korkeampitaajuisia, harmonisia yliaaltoja. Perusaallon lisäksi virrassa mukana oleva särövirta ei muutu lampussa valoksi, mutta varaa siirtokapasiteettia verkosta ja lisää häviöitä, minkä takia se on ongelmallinen erityisesti sähkölaitoksen kannalta. LED- ja pienloistelempujen elektroniseen liitäntälaitteeseen on mahdollista rakentaa yliaaltojen suodatus, mutta monissa lampuissa suodatusta ei ole.

4 Markkina- ja tuotekatsaus

4.1 Pienloistelamput

4.1.1 Tuotteiden ominaisuudet

Taulukossa 4.1 on katsaus myynnissä oleviin tuotteisiin. Kuten taulukosta nähdään E27-kantaisten pienloistelamppujen tehot vaihtelevat välillä 4-65 W ja valovirrat välillä 190-4200 lm. Eliniät vaihtelevat välillä 6000 h – 20 000 h, joka on 2,7 h / päivä polttojaksolla laskettuna 6-20 vuotta. Myynnissä olevien tuotteiden värielämytilat vaihtelevat välillä 2500-6500K. Useimmissa tuotteissa ei kuitenkaan ole malleja, joiden värielämytila on 6500 K. Yleisin värielämytila pienloistelampuilla on 2700-3000 K. Pienloistelamppujen värintoistoindeksit ovat 80-89.

Taulukko 4.1 Myynnissä olevat pienloistelampputyypit ja niiden ominaisuudet.

Purkausputken muoto	Teho [W]	Valovirta [lm]	CCT [K]	R _a	Elinikä [h]
Sauva	5-33	230-2250	2500-6500	80-89	8000-20 000
Kierteinen	5-65	270-4200	2500-4000	80-89	8000-12 000
Kuvalliset	4-23	200-1485	2500-2700	80-89	6000-20 000
Kynttilä	5-20	190-1160	2500-2700	80-89	6000-15 000

4.1.2 Valonsäätö

Pienloistelamput eivät pääsääntöisesti ole himmennettävissä, mutta myynnistä löytyy erikoislamppuja, joiden liitäntälaitteeseen on sisällytetty himmennysmahdollisuus. Himmennys on mahdollistettu myytävissä lamput kahdella eri tavalla: 1) Rakentamalla liitäntälaitteeseen elektroniikka, joka mahdollistaa yhteensopivuuden tyyppillisten hehkulamputhimentimien kanssa ja 2) rakentamalla himmennin itse lampun liitäntälaitteeseen, jolloin lamppu on mahdollista himmentää missä tahansa asennuksessa, jossa ei ole himmennintä. Muutamissa tuotteissa on himmentimen sijaan hämähäkytkin.

4.1.3 Elohopean määrä pienloistelampuissa

Elohopeaa myytävissä lamput on keskimäärin 3 mg. Pienin elohopeapitoisuus pienloistelampuissa on 1,41 mg. (Van Tichelen, Vercalsteren, 2009). RoHS- direktiivi rajoittaa elohopeamäärän enimmäismääräksi 5 mg (EY, 2002-95).

4.1.4 Erityyppisten pienloistelamppujen hintojen vertailu

Taulukossa 4.2 on asetuksen 244 taustaselvityksiin (Van Tichelen, Vercalsteren, 2009) perustuva katsaus pienloistelampun ominaisuuksien vaikutuksesta lampun hintaan. Tyyppillisen pienloistelampun polttoikä on 6000-10000 tuntia. Myynnissä olevien lamput pisin polttoikä on 15 000 tuntia. Pitkä polttoikä ei taulukon mukaan nosta kovin paljon 15 W pienloistelampun hintaa. Himmennettävillä 15 W pienloistelampuilla hinta voi sen sijaan olla jopa kaksinkertainen ei-himmennettäviin lamputuihin nähden.

Taulukko 4.2 Pienloistelampun ominaisuuksien vaikutus lampun hintaan (Van Tichelen, Vercalsteren, 2009).

Pienloistelampun ominaisuus	Teho [W]	Kupu	Valotehokkuus [lm/W]	CCT [K]	Ra	Elohopea [mg]	Elinikä [h]	Hinta [€]
Tyypillinen sauvalamppu	15	ei	50	2700	80-90	4	6000	4
Tyypillinen kuvullinen lamppu	15	kyllä	45	2700	80-90	4	6000	6
Korkea valotehokkuus	15	ei	57	2700	80-90	4	6000	5
Pitkä elinikä	15	ei	57	2700	80-90	4	10000	9
Erittäin pitkä elinikä	15	ei	57	2700	80-90	4	15 000	11
Pieni elohopeapitoisuus	15	ei	57	2700	80-90	1,25 - 4	6000	5
Pieni elohopeapitoisuus + pitkä elinikä	15	ei	57	2700	80-90	1,25 - 4	10 000	10
Himmennettävyyys	15	ei	61	2700	80-90	4	15 000	20

4.2 Halogeenilamput

4.2.1 Yleistä

Energiatohokkaimpia halogeenilamppuja ovat energialuokan B halogeenilamput. Kaikki energialuokkaa B heikommät halogeenilamput karsiutuvat myynnistä asetuksen myötä. Viimeisenä (vuonna 2016) poistuvat kauppojen hyllyiltä energialuokan C halogeenilamput. C- halogeenien toiminnalliset ominaisuudet ja hinnat eivät poikkea olennaisesti hehkulamputa. Sen vuoksi ne voivat alkuvaiheessa olla erinomainen vaihtoehto konservatiivisimmille kuluttajille, joiden tottuminen pienloistelamppuihin käy hitaammin.

4.2.2 Energialuokkien B ja C tuotteet

Energialuokan B halogeenilamput mahdollistavat 40-50 % energiansäästön hehkulamppuun verrattuna. Tuotteita ei kuitenkaan vielä juurikaan valmisteta ja niiden hinnat ovat jopa pienloistelamppuja korkeammat. Tilanne kuitenkin muuttunee asetuksen voimaantulon myötä ja hehkulamppujen sekä C-halogeenien poistuessa myynnistä.

Energialuokan C halogeenilamput ovat noin 30 % energiatohokkaampia kuin vastaavan valovirran omaavat hehkulamput. Niitä löytyy B-halogeeneihin verrattuna huomattavan runsas valikoima ja niiden hinnat ovat kohtuulliset.

Suurin ero lamppujen ominaisuuksissa on B-luokan halogeenilamppujen parempi valotehokkuus ja pitempi elinikä. B-luokan halogeenilamppujen elinikä on 3000 h, kun taas C-luokan halogeenilamppujen elinikä on 2000 h. Värintoistoindeksi ja värilämpötila ei halogeenilampuilla juurikaan eroa hehkulamputa. B-luokan halogeenilamput ovat infrapunapinnon ja muuntajan johdosta jonkin verran kalliimpia kuin C-luokan halogeenilamput. Taulukossa 4.3 on tyypillisen 42 W C-luokan halogeenilampun ominaisuuksien vertailu valovirrastaan yhtä suureen 30 W B-luokan halogeenilamppuun. Taulukosta nähdään, että B-luokan halogeenilampun hinta on melko paljon korkeampi kuin vastaavan C-luokan halogeenilampun, mutta elinikä on C-luokan lampulla 1000 h lyhyempi.

Taulukko 4.3 Myynnissä olevien B- ja C- energialuokan halogeenilamppujen ominaisuudet.

Lampputyyppi	Kanta	Kupu	Teho [W]	Valovirta [lm]	Valotehokkuus [lm/W]	CCT [K]	CRI (R _a)	Elinikä [h]	Hinta [€]
Hehkulamppu	E27	Kirkas	60	710	12	2700	100	1000	1
C-halogeneeni	E27	Kirkas	42	630	15	2900	100	2000	3,6
B-halogeneeni	E27	Kirkas	30	620	21	2850	100	3000	16,0

4.3 LED-lamput

4.3.1 Yleistä

LED- lamppujen ensimmäisen sukupolven tuotteet ovat hiljattain ilmestyneet markkinoille. LED-tekniikan suurin haaste on ollut erityisesti valovirran riittävyys. LED-lampuilla on jo nyt mahdollista saada suuri valaistusvoimakkuus kapealle keulanleveydelle. Ympärisäteilevien LED-lamppujen valaistusvoimakkuudet eivät kuitenkaan vielä yllä täysin yleisvalaistuksen vaatimuksiin. Matalissa teholuokissa (2-13 W) löytyy kuitenkin jo nyt myös ympärisäteilevissä LED-lampuissa tuotteita, jotka jo nyt jossakin määrin soveltuvat 15-60 W hehkulamppujen tilalle.

4.3.2 Ympärisäteilevät tuotteet

Ympärisäteilevien LED- lamppujen tehokkaimmat tuotteet ovat noin 8-13 W lamppuja, jotka vastaavat valovirraltaan noin 40-60 W hehkulamppuja. 6-8 W LED- lamput vastaavat valovirraltaan 25-40 W hehkulamppuja ja niitä löytyy myynnistä jo suuri määrä ja myös suurimmat yritykset valmistavat niitä. Taulukossa 4.4 on yhteenveto myynnissä olevien LED- lamppujen ominaisuuksista. Tuotteita löytyy useille värilämpötiloille välillä 2700...6500 K. Värintoisto-ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti. Joillakin tuotteilla värintoistoindeksi ilmoitetaan olevan jopa 90, kun taas joillakin R_a- indeksin nimellisarvo on alle 70. Suurimpien valmistajien tehokkaimmilla tuotteilla R_a- indeksi kuitenkin on yli 80.

Taulukko 4.4 Myynnissä olevien eri tehoisten LED- lamppujen ominaisuuksia.

Teho	Valovirta	Valotehokkuus	CCT	CRI	Elinikä	Hinta
[W]	[lm]	[lm / W]	[K]	R _a	[h]	[€]
13	600	46	3000-6000	75-80	50000	80
10	400-570	44-63	2850-6500	70-90	-	70
8	350-470	44-58	3000-6500	80-85	25000	70-90
6-7	240-400	40-57	2700-6500	80	45000	35-45
2	100	50	3000-6000	65	25000	15

Hehkulamppuja vastaavien tuotteiden suurin ongelma on vielä niiden korkea hinta. Suurimpien valmistajien 25-40 W hehkulamppuja vastaavat 6-8 W LED- lamppujen hinnan vaihteluväli on 35-70 €. Tätä tehokkaammat 10-13 W tuotteet ovat hinnaltaan noin 50-80 €. Toinen suuri ongelma on tehokkaimpien 9-15 W LED- lamppujen hehkulamppua huomattavasti suurempi koko ja paino, mikä johtuu niiden suuremmasta jäähdystarpeesta. 25-40 W hehkulamppuja vastaavat tuotteet eivät kuitenkaan juurikaan ole hehkulamppuja kookkaampia mutta jonkin verran painavampia. Myynnissä olevat LED- lamput ovat myös melko huonosti himmennettävissä. Useimmat tuotteet eivät ole yhteensopivia himmentimien kanssa.

5 Mittaukset

5.1 Yleistä

5.1.1 Mittauksissa käytetyt lamput ja valaisimet

Taulukossa 5.1 on yhteenveto mittauksissa mukana olleista pienloistelampuista (kuva 5.1), LED- lampuista (kuva 5.2), B- energialuokan halogeenilampuista (kuva 5.3) sekä muista mitatuista lampuista. Taulukossa näkyy myös lampuista käytetyt nimitykset. Polttokokeessa oli lamppeja kolme kappaletta jokaista tuotetta, joten mittaustulokset valovirtamittausten osalta ovat kolmen lampun keskiarvo. Polttokokeessa olleita lamppeja oli lisäksi neljäs, ylimääräinen kappale, jota käytettiin muissa mittauksissa. Mukana on yksi himmennettävä LED- ja pienloistelamppu ja näitä testattiin TRIAC-himmentimellä.



Kuva 5.1 Mittauksissa mukana olleita pienloistelamppuja.



Kuva 5.2 Mittauksissa mukana olleet LED- lamput



Kuva 5.3 Mittauksissa mukana olleet B- halogeenit.

Lamppujen lisäksi mittauksissa oli mukana erityyppisiä valaisimia (kuva 5.4), joilla testattiin valaistustulosta ja valaisimen vaikutusta lampun valontuottoon. Avoimia valaisimia oli kaikkiaan kolme kappaletta: yksi pöytävalaisin, yksi varjostin ja yksi ripustettava kattovalaisin. Mittauksissa oli avoimien valaisimien lisäksi yksi suljettu IP44- suojausluokan valaisin (kuvassa oikealla).



Kuva 5.4 Mittauksissa mukana olleet valaisimet.

Taulukko 5.1 Mittauksissa mukana olleet lamput.

Lamppujen nimitykset	Teho [W]	Pienloistelampun tyyppi	Nimellinen valovirta [lm]	Määrä	Himmennettävä
PIENLOISTELAMPUT					
MS 23W	23	Kierteinen	1550	4	-
MC 20W	20	Sauva	1300	4	-
ODSSMT 18W	18	Kierteinen	1200	4	-
PT 15W	15	Kierteinen	950	4	-
NL 15W	15	Kuvallinen	800	4	-
ODS 15W	15	Kuvallinen	850	4	-
ML 15W	15	Sauva	950	1	-
PS 12W	12	Kuvallinen	610	4	-
PES 12W	12	Sauva	650	4	-
PT 12W	12	Kierteinen	-	1	-
ODSMT 11W	11	Kierteinen	680	4	-
GE 11W	11	Sauva	640	4	-
ML 11W	11	Sauva	700	1	-
MD 9W	9	Kuvallinen (kynttilä)	405	4	X
LED-LAMPUT		Suuntaava/Ympärisäteilevä			
X-Leds 20W	20	Suuntaava	860	4	-
LEDTR 14W	14	Suuntaava	525	4	-
ELE 13W	13	Ympärisäteilevä	650	1	-
X-Leds 10W	10	Ympärisäteilevä	480	4	-
OP 8W	8	Ympärisäteilevä	345	4	-
OEL 7W	7	Ympärisäteilevä	300	4	-
LL 6W	6	Ympärisäteilevä	225	4	-
PM 6W	6	Ympärisäteilevä	240	6	X
OP 2W	2	Ympärisäteilevä	100	4	-
HALOGEENILAMPUT		Energialuokka / Kupu			
C 42W	42	C / Kirkas	630	3	X
B 30W	30	B / Kirkas	620	4	X
B 20W	30	B / Kirkas (kynttilä)	370	4	X
HEHKULAMPUT		Kuvun tyyppi			
Hehku 75W	75	Kirkas	935	4	X
Hehku 60W	60	Kirkas	710	4	X
Hehku 40W	40	Kirkas	410	2	X
Hehku 25W	25	Kirkas	220	2	X
Hehku 15W	15	Kirkas	90	1	X

5.2 Mittausmenetelmät

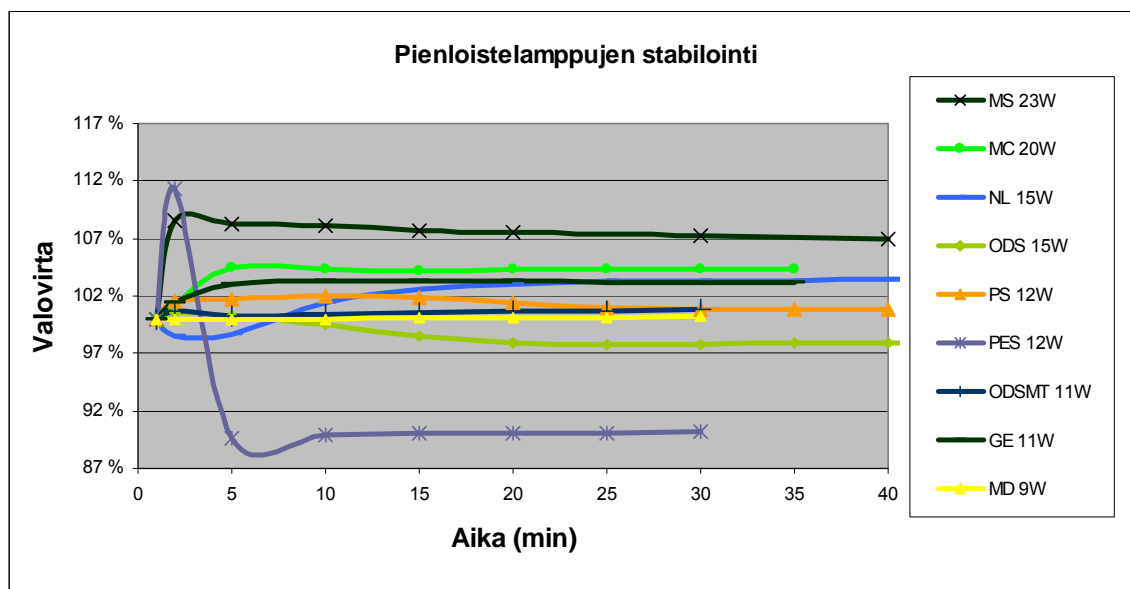
5.2.1 Valoteknisten arvojen määrittäminen integroivassa pallossa

Valotekniset arvot mitattiin integroivassa pallossa ja mittauksessa määritettiin seuraavat suuret: valovirta (lm), värieläpötila (CCT / K), värintoistoindeksi (R_a) sekä värikoordinaatit x ja y. LED- ja pienloistelamppujen mittaukset tehtiin pienloistelamppustandardin (IEC, 1987c) vaatimusten mukaisesti. Halogeeni- ja hehkulamppujen mittauksissa noudatettiin hehkulamppustandardin (IEC, 1987a) vaatimuksia.

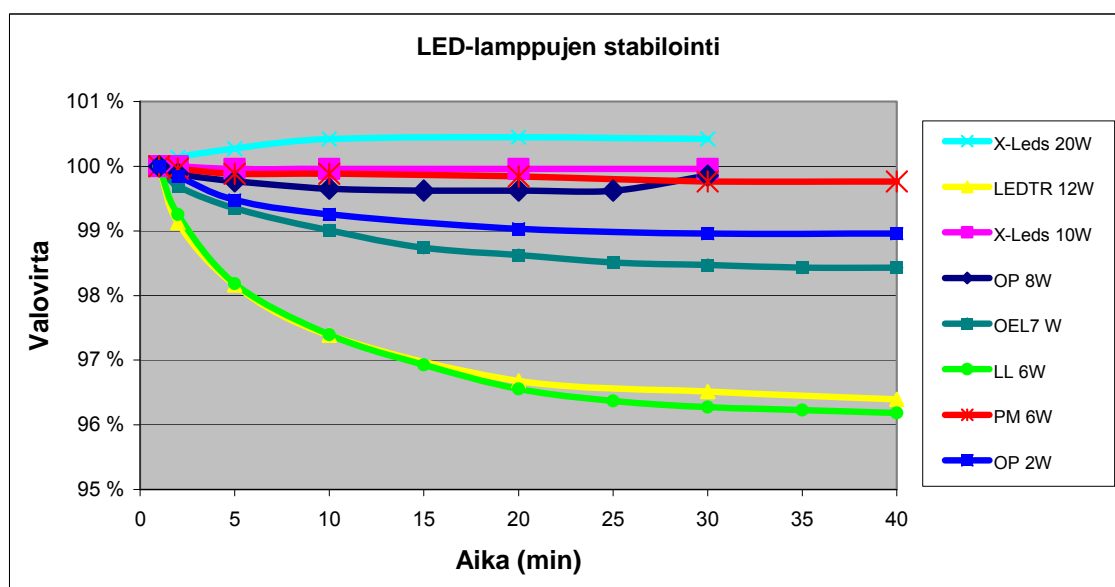
Lamppujen jännite stabiloitiin nimellisjännitteeseen 230V. LED- ja pienloistelamppujen valovirta stabiloitiin polttamalla lamppuja mittaussäennossa 2 tunnin ajan, jonka jälkeen ne vietiin integroivaan palloon, jossa niiden stabilointia jatkettiin noin 20-30 minuuttia ennen mittauksia. Lämpötila mittaushuoneessa oli hehku- ja pienloistelamppustandardien mukainen eli $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. LED- ja pienloistelamppujen valotekniset arvot määritettiin 100 h vanhennetuilla lampuilla, jolloin tulokset ovat vertailukelpoisia valmistajien ilmoittamien nimellisarvojen kanssa, jotka myös määritetään 100 h vanhennetuilla lampuilla. Hehku- ja halogeenilamppujen valovirran määrittämisessä lamppuja oli ennen mittauksen tekemistä poltettu 1h hehkulamppustandardin mukaisesti.

5.2.2 LED- ja pienloistelamppujen stabilointiajat integroivassa pallossa

Ennen mittauksia LED- ja pienloistelamppuja stabiloitiin vähintään 20-30 minuuttia integroivassa pallossa. Lamppuja lisäksi esilämmitettiin kahden tunnin ajan kanta ylöspäin polttoasennossa ennen viemistä integroivaan palloon stabiloitumaan. Standardin (IEC, 1987b) mukaan pienloistelamppujen valovirran stabiloituminen voi kestää jopa 15 tuntia, mutta jos lamppuja on esilämmitetty ennen stabiloimista kahden tunnin ajan, riittää stabiloimisajaksi standardin mukaan 15 minuuttia. Riittävästä stabiloimisesta varmistuttiin mittaamalla jokaisen lampputyypin yhdestä yksilöstä valovirta 30-40 minuutin ajan. Tulokset näkyvät kuvissa 5.5 ja 5.6.



Kuva 5.5 Pienloistelamppujen stabiloituminen integroivassa pallossa.



Kuva 5.6 LED- lamppujen stabiloituminen integroivassa pallossa.

5.2.3 Polttokoe

Korvaavien lamppujen valovirran alenemaa ja elinikää sekä sytyttämisen vaikutusta siihen tutkittiin polttokokeessa, jossa lamppujen valotekniset mittaukset integroivassa pallossa toistettiin 100 h, 1000 h ja 2000 h tunnin polton jälkeen. Lamppuja poltetaan lähes avoimessa polttotelineessä ja ne kytketään kellokytkimien kautta 230V

jännitestabilisaattoriin. Kellokytkimet ajastetaan (IEC, 1987c) standardin mukaan siten, että lamput palavat 2 h 45 min kerralla, jonka jälkeen ne sammutetaan 15 min ajaksi. Lämpötila polttotelineessä oli 33 °C, joka on hieman standardin (IEC, 1987c) vaatimusta korkeampi, mikä on huomioitava mittaustulosten tulkinnessa.

5.2.4 LED- lamppujen lämpenemisominaisuuksien mittaus

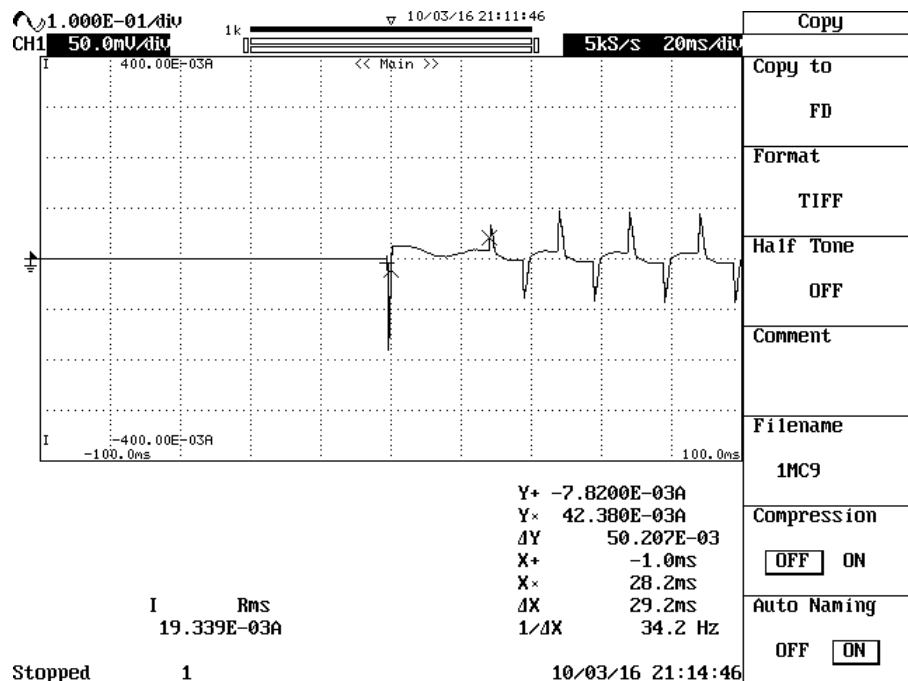
LED- lamppujen valovirran muutos lampun lämmetessä mitattiin integroivassa pallossa. Mittaus tapahtui kuten normaali valovirtamittaus sillä erolla, että lamput olivat olleet polttamatta 24h ennen mittausta. Arvoja otettiin ylös 1, 2 5, 10 ja 15 minuutin kohdalla 2 h ajan mittausvälin kuitenkin harvetessa 1 h jälkeen. Mittaus tehtiin 100 h vanhennetuilla LED- lampuilla ja mittauksessa oli yksi yksilö kutakin lamppua.

5.2.5 Pienloistelamppujen lämpenemisaikojen mittaus

Pienloistelamppujen lämpenemisaikojen mittauksissa noudatettiin (IEC, 1987c) standardin vaatimuksia. Pienloistelamppujen lämpenemisajat mittauksessa käytetyt laitteet olivat valaistusvoimakkuusmittari, jännitestabilisaattori, yleismittari ja sekuntikello. Lamppu asetettiin kanta ylöspäin irralliseen kantaan siten, että lamppu oli suorassa kulmassa valaistusvoimakkuusmittarin valokennon yläpuolella. Etäisyys lampun kuvun tai putken päästä valokennoon oli kaikissa mittauksissa 90 cm. Mittaushuone oli mittauksen ajaksi pimennetty ylimääräisestä valosta. Valaistusvoimakkuusmittarista luettiin arvot 2 minuutin ajan 5 sekunnin välein, minkä jälkeen mittarin lukuväliä harvennettiin. Arvoja kirjattiin kuitenkin niin kauan, että mittarin lukema ei enää merkittävästi muuttunut. Mittausajat vaihtelivat 30 ja 270 minuutin välillä lampusta riippuen. Mittaukset tehtiin 100h vanhennetuilla lampuilla ja jokaisesta pienloistelampusta mitattiin kolme yksilöä. Lämpenemisaikojen mittaustulokset ovat kolmen lampun keskiarvo.

5.2.6 Pienloistelamppujen syttymisaikojen mittaus

Syttymisaikamittauksessa käytetyt laitteet olivat oskilloskooppi, virtamittapää, yleismittari ja jännitestabilisaattori. Mittauksen aluksi pienloistelamppujen jännite stabiloitiin standardin (IEC, 1987c) mukaisesti arvoon 211,6 V, joka on 92 % nimellisjännitteestä 230 V. Jännitestabilisaattorista virta johdettiin yleismittarin kautta lamppuun, joka oli asetettu kanta ylöspäin. Oskilloskooppi asetettiin liipaisemaan lampun virrasta kanavalta, johon oli liitetty virtamittapää. Syttymisajat mitattiin oskilloskoopin kursoreiden avulla virran käyrämuodosta. (kuva 5.7) Kursori 1 asetettiin alkuhetkeen, joka ilmenee virran käyrämuodosta virtapiikkinä. Kursorin 2 paikka asetettiin hetkeen, jolloin virtakäyrä vakiintui lopulliseen muotoonsa. Kursoreiden välinen aikaero luettiin oskilloskoopin näytöltä. Mittaukset tehtiin 100 h vanhennetuilla lampuilla ja kutakin lampputyyppiä mitattiin kolme kappaletta. Kunkin pienloistelampun mittaustulokset ovat keskiarvo kolmen yksilön syttymisajoista.



Kuva 5.7 Pienloistelamppujen syttymisajan mittaus oskilloskoopin avulla virran käyrämuodosta.

5.2.7 Harmonisten yliaaltojen mittaus

Harmoniset yliaallot mitattiin pääosin oskilloskoopilla virran käyrämuodosta, joka mitattiin virtamittapään avulla. Mittaus tapahtui siten, että ensin mitattiin 50 Hz:n perustaajuinen virta (I_1) ja sen 100 Hz:n, 150 Hz:n jne. taajuudella olevat yliaallot (I_2 , I_3 ...) oskilloskoopilla, minkä jälkeen niistä laskettiin kokonaissärökerroin (THD), joka määritellään kaavan 7 avulla

$$THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \quad (7)$$

Mittaustulos oskilloskoopilla tehdyssä mittauksessa on hetkellisarvo virran käyrämuodosta. Koska virran käyrämuoto vaihtelee ajan mukana, mittaustuloksissa on jonkin verran epätarkkuutta. Harmoniset yliaallot mitattiin tämän takia muutamien lamppujen osalta myös tarkemmalla menetelmällä, jossa harmoniset komponentit määritettiin sekunnin välein noin kymmenen minuutin ajan mittaustuloksen ollessa mitattujen arvojen keskiarvo. Käytetty mittalaite tarkemmassa menetelmässä oli TOPAS 1000- sähkönlaatuanalysointilaite. Mittaustulokset esitetään kummallakin menetelmällä mitattuna.

5.2.8 Himmennyksen vaikutus valo- ja sähkötekniisiin arvoihin

Kaksi mittauksessa mukana olevista lamputa on himmennettäviä ja niitä tutkittiin asuinrakentamisessa yleisen TRIAC- himmentimen avulla. Mittauksissa testattiin valo- ja sähkötekniisten ominaisuuksien muuttumista, kun lamppu himmennetään täydestä tehosta 75 %:iin ja 50 %:iin. Valotekniisten ominaisuuksien mittaus tehtiin integroivassa pallossa ja sähkötekniiset arvot mitattiin yleismittarilla ja oskilloskoopilla. Lamppuja stabiloitiin integroivassa pallossa noin 2 tuntia ennen mittausta. Mittauksissa käytetyt lamput olivat jonkin verran yli 100 h vanhennettuja ja mittauksissa oli mukana yksi kappale kumpaakin lamppua.

5.2.9 Valovirran aleneman määrittäminen suljetussa IP44- luokan valaisimessa

LED- ja pienloistelamppujen soveltuvuutta asuinrakentamiseen testattiin mittaamalla valovirran muutos suljetussa valaisimessa, jonka suojausluokka oli IP44. Mittauksen

tarkoituksena oli osoittaa amalgaamilamppujen paremmuus suljetuissa valaisimissa tavanomaiseen pienloistelamppuun verrattuna. LED- lamppujen osalta tarkoituksena oli tutkia valovirran aleneman suuruutta mainitun tyyppisessä valaisimessa verrattuna tilanteeseen, jossa lamppua poltetaan ilman valaisinta normaalissa huoneenlämpötilassa. Mittaukset tehtiin 100 h vanhennetuilla lampuilla ja mittauksissa oli kutakin lamppua yksi kappale.

5.2.10 Valonjaon mittaus goniometrissä (tulokset luku 6)

Korvaavien lamppujen valonjako mitattiin sekä ilman valaisinta että eri tyyppisissä avoimissa hehkulamppuvalaisimissa. Mittaukset tehtiin goniometrillä. LED- ja pienloistelamppuja oli lämmitetty ennen goniometriin viemistä vähintään 2 tuntia ja lisäksi niiden annettiin stabiloitua goniometrissä ennen mittauksen aloittamista noin 15 minuuttia. Mittaukset tehtiin jonkin verran yli 100 h vanhennetuilla LED- ja pienloistelampuilla ja muutaman tunnin vanhennetuilla hehkulamppuilla. Mittaustulokset esitetään luvussa 6.

5.2.11 Valaistustuloksen simulointi (tulokset luku 6)

Valaistustulosta korvaavilla lampuilla simuloitiin DIALux valaistuslaskentaohjelmalla. Simulointi tapahtui siten, että valonjakomittauksen tulokset muunnettiin DIALux-yhteensopivaan muotoon eli Eulumdat- tiedostoiksi. DIALux:n avulla luotiin tyypillinen 3 m x 3 m x 2,8 m asuinrakennuksen huone huonepintojen heijastuskertoimien ollessa 0,7 (katto), 0,5 (seinät) ja 0,2 (lattia) ja alenemakertoimen ollessa 0,8. Valaistusvoimakkuus huoneen eri pinnoilla laskettiin DIALux:n avulla erityyppisillä lampuilla ja valaisimilla. Mittaustulokset esitetään luvussa 6.

5.3 Mittaustulokset

5.3.1 Valovirta ja valotehokkuus

Taulukossa 5.2 on esitetty mitattujen lamppujen valovirta ja valotehokkuus. Valmistajat ilmoittavat LED- ja pienloistelamppujen valovirran 100 h polton jälkeen. Taulukosta nähdään, että ero valmistajien ilmoittamiin nimellisarvoihin ja 100 h polton jälkeen mitattuihin arvoihin on pienloistelampuilla keskimäärin +1 %. Asetuksen 244 mukaan 100 h jälkeen mitattu valovirta ei saa olla yli 10 % huonompi kuin nimellisarvo, joten kaikki pienloistelamput täyttävät asetuksen vaatimuksen. Joidenkin LED- lamppujen 100 h jälkeen mitattu valovirta on yli 20 % nimellisarvoa alempi. Ympärisäteilevät lamput kuitenkin täyttävät asetuksen 244 10 %:n vaatimuksen melko hyvin yhden lampun valovirran kuitenkin ollessa 11% nimellisarvoa alempi. Hehku- ja halogeenilamppujen mittaukset tehtiin 1h polton jälkeen valmistajien myös ilmoittaessa hehku- ja halogeenilamppujen nimellisarvon 1h vanhennukseen perustuen. Hehkulamppujen valovirta vastasi lähes täysin nimellisarvoa, halogeenilampuilla mitattu arvo oli 7-9 % alempi, mikä täyttää hehkulamppustandardin (IEC, 1987a) 10 %:n vaatimuksen.

Mitattujen pienloistelamppujen valotehokkuus 100 h polton jälkeen oli keskimäärin 58 lm/W, LED- lamppujen 44 lm/W, halogeenilamppujen 17 lm/W ja hehkulamppujen 12 lm/W. Mitatut halogeenilamput kuuluivat valmistajien mukaan energialuokkiin B ja C. 30W energialuokan B halogeenin valovirran nimellisarvo on 620 lm ja nimellinen valotehokkuus 21 lm/W. Mittauksen mukaan kyseisen lampun valotehokkuus on kuitenkin vain 19 lm/W, minkä vuoksi kyseinen lamppu kuuluisikin energialuokkaan C. Mittaustulokseen kuitenkin näyttäisi vaikuttavan huomattavasti mittaushetki. Mitatun energialuokan B halogeenilampun valovirta vaihteli huomattavasti mittauksen alussa. Mittaus tehtiin tunnin kuluttua virran kytkemisestä. Mikäli mittaus olisi tehty esimerkiksi 15 minuutin lämmitysajan jälkeen, olisivat lampun valovirta ja myös valotehokkuus olleet huomattavasti suuremmat ja lamppu yltänyt energialuokan B valotehokkuuteen. Mittaus tehtiin hehkulamppustandardin (IEC, 1987a) mukaan eikä kyseinen standardi kerro kuinka kauan lamppujen on lämmitävä ennen mittauksen

tekemistä. Mitatun energialuokan B halogeenilampun valovirran huomattava vaihtelu johtui todennäköisimmin lampun kannassa olevasta muuntajasta.

Taulukko 5.2 Korvaavien lamppujen nimellinen ja 100 h jälkeen mitattu valovirta.

	Nim. valovirta	Mitattu valovirta		Valotehokkuus
	[lm]	[lm]	Ero nimelliseen	[lm / W]
Pienloistelamput	832	842	1 %	58
MS 23W	1550	1480	-5 %	65
MC 20W	1300	1371	5 %	65
NL 15W	800	773	-3 %	52
ODS 15W	850	892	5 %	57
PS 12W	610	635	4 %	54
PES 12W	650	716	10 %	60
ODSMT 11W	680	691	2 %	64
GE 11W	640	640	0 %	59
MD 9W	405	383	-5 %	42
LED- lamput	384	356	-3 %	44
<i>Suuntaavat</i>	<i>692</i>	<i>588</i>	<i>-17 %</i>	<i>37</i>
X-Leds 20W	860	758	-12 %	39
LEDTR 14W	525	417	-21 %	35
<i>Ympärisäteilevät</i>	<i>282</i>	<i>279</i>	<i>2 %</i>	<i>47</i>
X-Leds 10W	480	481	0 %	56
OP 8W	345	339	-2 %	43
OEL 7W	300	267	-11 %	41
LL 6W	225	208	-8 %	40
PM 6W	240	250	4 %	36
OP 2W	100	130	30 %	63
Halogeenilamput	540	496	-8 %	17
C 42W	630	587	-7 %	14
B 30W	620	564	-9 %	19
B 20W	370	338	-9 %	17
Hehkulamput	823	837	2 %	12
75W	935	988	6 %	13
60W	710	686	-3 %	11

5.3.2 Väriominaisuudet

Taulukossa 5.3 on 100 h vanhennettujen lamppujen värilämpötilat ja värintoistoindeksi sekä valmistajien ilmoittama nimellinen värilämpötila. Mitattujen pienloistelamppujen värilämpötilan vaihteluväli on 2500-3000 K ja LED- lamppujen 2700-3200 K. Sekä LED- että pienloistelamppujen värilämpötilan keskiarvot olivat erittäin lähellä hehkulamppua (2700 K). Pienloistelamppujen värilämpötila oli keskimäärin 50 K suurempi kuin nimellinen värilämpötila eli mitattu värisävy oli hieman nimellistä kylmempi. LED- lampuilla mitattu arvo oli keskimäärin 54 K lämpimämpi. Yhdellä tuotteella ero nimelliseen värilämpötilaan oli -326 K, mikä vaikuttaa huomattavasti keskiarvoon. LED- lamppujen nimellisen ja mitatun värilämpötilan eron vaihteluväli oli -326...187 K.

Pienloistelamppujen värintoistokykyä kuvaavan R_a - indeksin vaihteluväli oli 81-85 ja keskiarvo 83. Kaikki pienloistelamput täyttävät asetuksessa 244 olevan lamppujen toimintavaatimuksen $R_a > 80$. LED- lamppujen R_a - indeksi vaihteli välillä 53-87 ja keskiarvo oli 74, mikä on hieman vähemmän kuin asetuksen 244 vaatimus ($R_a > 80$). Suurimpien valmistajien tehokkaimmilla tuotteilla (OP8W ja PM6W) värintoisto kuitenkin täytti asetuksen vaatimuksen.

Taulukko 5.3 Korvaavien lamppujen värilämpötila ja värintoistoindeksi.

	CCT [K]			CRI (R _a)
	Nimellisarvo	100h mittaus	Ero nimelliseen	100h mittaus
Pienloistelamput	2711	2761	50	83
MS 23W	3000	3026	26	85
MC 20W	2700	2739	39	83
NL15W	2700	2800	100	84
ODS 15W	2700	2852	152	81
PS 12W	2700	2658	-42	83
PES 12W	2700	2798	98	83
ODSMT 11W	2500	2511	11	84
GE 11W	2700	2711	11	84
MD 9W	2700	2756	56	83
LED-lamput	2969	2915	-54	74
<i>Suuntaavat</i>	3100	2998	-102	73
X-Leds 20W	3000	2910	-90	58
LEDTR 14W	3200	3086	-114	87
<i>Ympärisäteilevät</i>	2925	2887	-38	74
X-Leds 10W	2850	2813	-37	53
OP 8W	3000	3187	187	85
OEL 7W	3000	2936	-64	77
LL 6W	3000	2674	-326	83
PM 6W	2700	2766	66	83
OP 2W	3000	2946	-54	64
Halogeenilamput	2930	2875	-4	99
C 42W	-	2835	-	99
B 30W	2930	2926	-4	99
B 20W	-	2869	-	99
Hehkulamput	-	2766	-	100
75W	-	2799	-	100
60W	-	2732	-	99

5.3.3 Valovirran alenema ja lamppujen kuolleisuus

Taulukossa 5.4 on valovirran alenema polttokokeessa 2000 h polton jälkeen verrattuna 100 h mittauksen tuloksiin. Kuvuttomien pienloistelamppujen valovirran alenema oli 5-12 % ja kuvullisten 17-19 %. Ympärisäteilevien LED- lamppujen valovirta oli 2000 h polton jälkeen laskenut keskimäärin 1 % ja halogeenilamppujen 6 %. Asetuksen 244 1. vaiheessa voimaan astuneiden 1. toimintavaatimusten asettama vaatimus on 15 % kuvuttomille ja 20 % kuvullisille lampuille. Kaikki mitatut lamput täyttävät siis asetuksen 1. vaiheen vaatimuksen valovirran aleneman osalta.

Lamppujen kuolleisuus ennaikaisen vikaantumisen johdosta on ollut verrattain vähäistä. Pienloistelamppuja ei ole 3000 h mennessä kuollut vielä yhtäkään kappaletta eikä myöskään LED- lamppuja. B- luokan halogeenilamppujen eliniäksi ilmoitetaan 3000 h. Kaikki 30W B- halogeenit kuolivat noin 2500-3000 h kohdalla. C- halogeenien eliniäksi ilmoitetaan 2000 h ja ne kuolivat hieman 2000 h mittauksen jälkeen. Jonkin verran halogeenilamppujen tuloksiin vaikuttanee se, että jännite polttotelineessä oli noin 220 V 2000 h asti, jolloin se nostettiin 230 V:iin, joka sen standardin (IEC, 1987c) mukaan kuuluu olla. Jos jännite olisi 1000-2000 h ajan ollut 230 V, halogeenit olisivat kuolleet jonkin verran aiemmin. Samasta syystä joitakin eliniältään 1000 h hehkulamppuja oli elossa vielä 2000 h mittauksessa. Jännitteen vaikutus hehkulampun polttoikänsä on verraten suuri. 5 %:n alijännite pidentää hehkulampun elinikää jopa 96 % (Halonen, Lehtovaara, 1992).

Taulukko 5.4 Korvaavien lampujen valovirran alenema 100 h mittauksesta 2000 h mittaukseen.

	1. mittaus	1000h mittaus		2000h mittaus	
	[lm]	[lm]	Muutos %	[lm]	Muutos %
Pienloistelamput	917	834	-7 %	801	-11 %
MS 23W	1480	1389	-6 %	1360	-8 %
MC 20W	1371	1293	-6 %	1270	-7 %
NL 15W	773	703	-9 %	641	-17 %
ODS 15W	892	762	-15 %	721	-19 %
PS 12W	635	563	-11 %	525	-17 %
PES 12W	716	670	-6 %	631	-12 %
ODSMT 11W	691	673	-3 %	656	-5 %
GE 11W	640	619	-3 %	601	-6 %
LED-lamput	348	379	1 %	375	0 %
<i>Suuntaavat</i>	<i>587</i>	<i>595</i>	<i>1 %</i>	<i>590</i>	<i>1 %</i>
X-LEDs 20W	758	768	1 %	759	0 %
LEDTR 14W	417	421	1 %	421	1 %
<i>Ympärisäteilevät</i>	<i>276</i>	<i>271</i>	<i>1 %</i>	<i>268</i>	<i>-1 %</i>
X-Leds 10W	481	496	3 %	497	3 %
LL 6W	208	208	0 %	202	-3 %
PM 6W	250	248	-1 %	244	-2 %
OP 2W	130	131	1 %	128	-2 %
Halogeenilamput	496	574	0 %	540	-6 %
C 42W	587	543	-7 %	487	-17 %
B 30W	564	605	7 %	592	5 %
Hehkulamput	837	777	-7 %	571	-17 %
75W	988	917	-7 %	-	-
60W	686	636	-7 %	571	-17 %

5.3.4 Pienloistelamppujen syttymisajat

Pienloistelampun syttymisaika on määritelmän mukaan aika, jonka sähköpurkauksen vakiintuminen purkausputkessa kestää. Asetuksen 244 vaatimus sille on 2,0 s. Syttymisaikojen mittaustulokset ovat taulukossa 5.5. Pienloistelamppujen syttymisajat olivat keskimäärin 0,64 s, mutta vaihteluväli oli kuitenkin huomattava (0,02...1,8 s) (taulukko 5.5). Kaikki mitatut pienloistelamput täyttävät asetuksen 244 vaatimuksen. Suuret erot syttymisajoissa selittyvät elektrodien lämmitykseen käytetyllä ajalla, joka on nopeasti syttyvillä lampuilla verraten lyhyt. Lyhyt elektrodien lämmitysaika ennen sytyttämistä tarkoittaa yleensä, että lampun sytytysjännite on suurempi. Suuremman jännitteen takia elektrodit kuluvat enemmän ja kestävät pienemmän määrän sytytyksiä, mikä johtaa lampun eliniän lyhenemiseen.

Taulukko 5.5 Pienloistelamppujen syttymisaajat.

	Syttymisaika [s]
Keskiarvo	0,64
MS 23W	1,30
MC 20W	1,44
ODSSMT 18W	0,02
PT 15W	0,02
NL 15W	0,79
ODS 15W	0,08
PS 12W	1,83
PES 12W	0,09
ODSMT 11W	1,34
GE 11W	0,06
MD 9W	0,03

5.3.5 Pienloistelamppujen lämpenemisajat

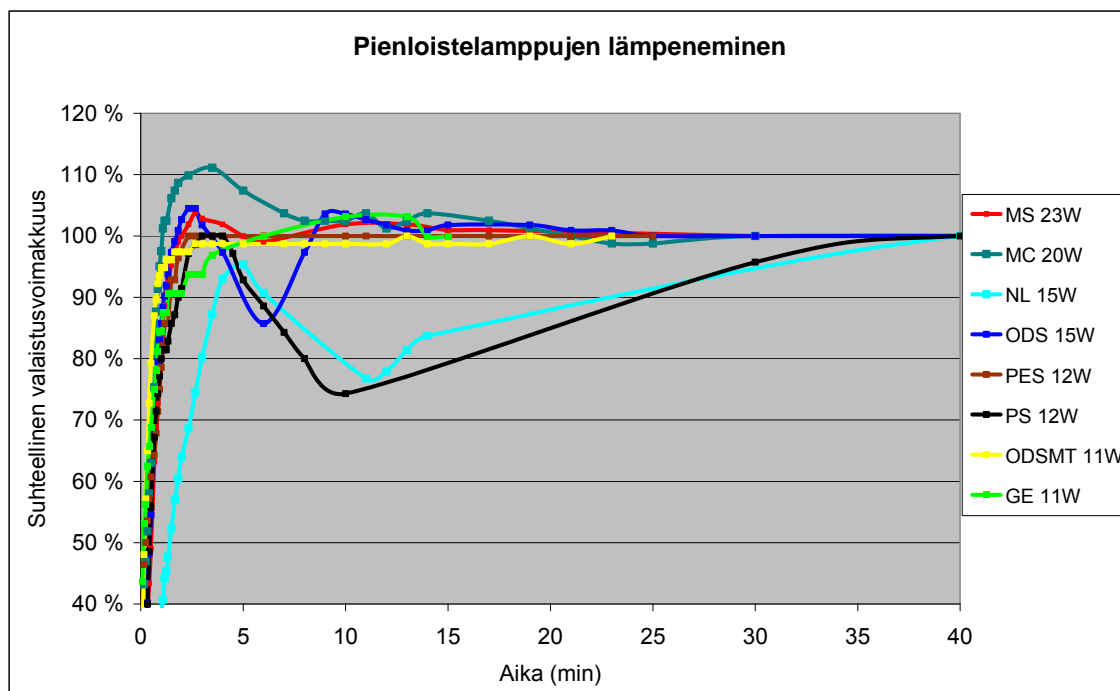
Lamppujen lämpenemisajat on esitetty taulukossa 5.6 ja kuvassa 5.8 näkyy pienloistelamppujen valovirta syttymishetken jälkeen. Lämpenemisajat on laskettu keskiarvona kolmen yksilön mittaustuloksesta. Kuvassa 5.8 on kunkin lampun yhden yksilön suhteellinen valaistusvoimakkuus aikavälillä 0-40 min.

Pienloistelamppujen lämpenemisajat olivat keskimäärin 41 s. Yhden lampun (NL15W) lämpenemisaika oli 102 s. Kyseisen tuotteen selvästi muita hitaampi valovirran nousu näkyy selvästi myös kuvasta 5.8. Muiden lamppujen lämpenemisajat vaihtelevat välillä 16-83 s. Kyseisen tuotteen hidas lämpeneminen selittyy osin sillä, että se sisältää elohopeaa amalgaamimuodossa kuvasta johtuvan lämmön nousun aiheuttaman valovirran aleneman estämisen takia. Muiden amalgaamilamppujen lämpenemisajat olivat kuitenkin huomattavasti lyhyemmät.

Taulukko 5.6 Pienloistelamppujen lämpenemisajat.

	Amalgaami	Lämpenemisaika [s]
Kaikki		41
<i>Amalgaami</i>		54
<i>Ei-amalgaami</i>		21
MS 23W	X	40
MC 20W	X	35
ODSSMT 18W		21
NL 15W	X	102
ODS 15W	X	39
PS 12W	X	23
PES12W		29
ODSMT 11W		19
GE 11W		16
MD 9W	X	83

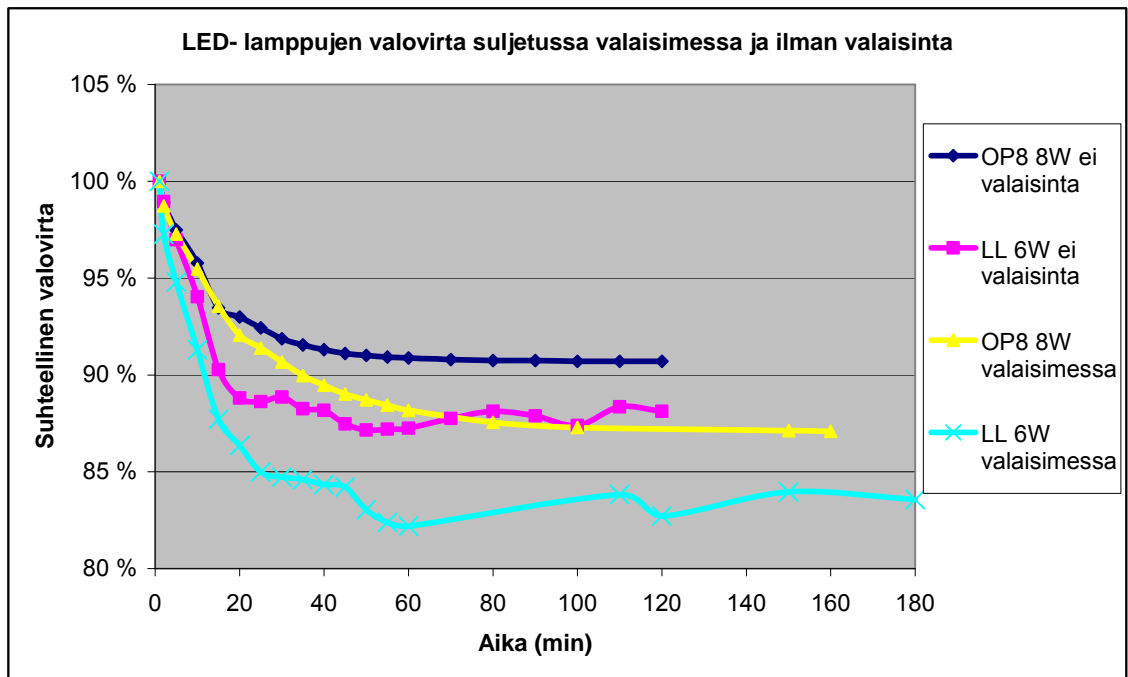
Kuvasta 5.8 voidaan nähdä, että joidenkin amalgaamilamppujen (kuten PS12W ja NL15W) valovirta lähtee selvään laskuun noustuaan ensin lähelle suurinta arvoaan. Se ei kuitenkaan vaikuta lämpenemisaikaan, koska alenema on vähemmän kuin 40%. Jonkin ajan kuluttua valovirta lähtee niillä jälleen nousuun ja on stabiloitunut lopulliseen arvoonsa 30-40 minuutin jälkeen. Tavanomaiset ei-amalgaamilamput (ODSMT11W, GE11W ja PES12W) lämpenevät muutamassa minuutissa lopulliseen valovirtaansa.



Kuva 5.8 Pienloistelampun valovirran muutos syttymishetken jälkeen. Arvot ovat suhteellisia valaistusvoimakkuuksia. Referenssiarvo on viimeinen mitattu valaistusvoimakkuusarvo.

5.3.6 LED- lamppujen valovirta syttymishetken jälkeen ja suljetun valaisimen vaikutus siihen

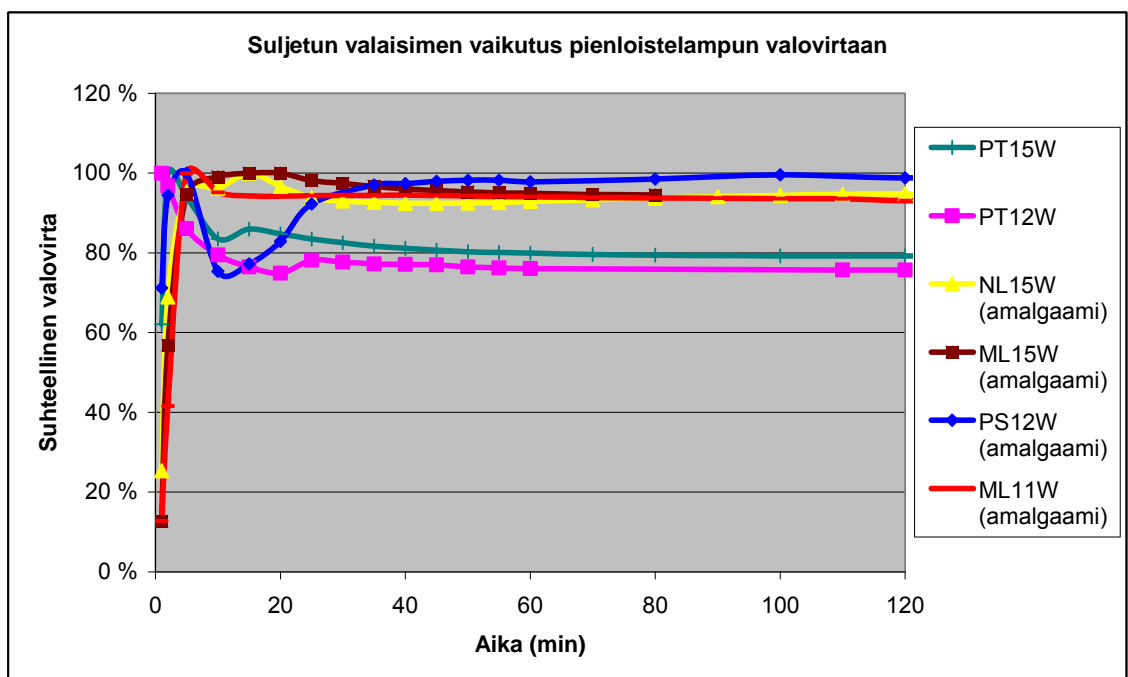
LED- lamput tuottavat täyden valovirran lampun ollessa kylmä heti käynnistymishetken jälkeen. Valovirta laskee lampun lämmitessä johonkin arvoon, joka on matalampi kuin valovirta alussa. Suljetussa valaisimessa lamppu lämmittää valaisimen sisäilmaa, jolloin olosuhteet ovat vaativammat. Tällöin valovirta laskee enemmän kuin lampun ollessa huoneenlämpötilassa. Kuvassa 5.9 on esitetty LED- lamppujen suhteellinen valovirta mitattuna 120-180 min ajan ilman valaisinta ja suljetussa valaisimessa, jonka suojausluokka on IP44. Referenssiarvona on suurin mitattu valovirta eli valovirta syttymishetkellä. Mitatuilla lampuilla valovirran lasku on noin 4-21 % suurimmasta arvostaan ilman valaisinta. Kuvasta voidaan nähdä suljetun valaisimen vaikutus valovirtaan. Tulosten mukaan valovirran jatkuvan tilan arvo on vain noin 4-5 % alempi suljetussa valaisimessa kuin ilman valaisinta eli suljettu valaisin ei vaikuttanut mitattujen lamppujen valovirtaan kuin hieman.



Kuva 5.9 LED- lampujen valovirran muutos suljetussa valaisimessa. Arvot ovat suhteellisia arvoja. Referenssiarvona on mittausaikavälin suurin arvo.

5.3.7 Suljetun valaisimen vaikutus pienloistelamppujen valontuottoon

Kuvassa 5.10 on suhteellinen valovirta tavanomaisilla ja amalgaamipienloistelampuilla suljetussa IP44- luokan valaisimessa. Arvot ovat suhteellisarvoja referenssiarvon ollessa suurin arvo mittausaikavälillä 0-120 min. Kuvasta voidaan nähdä, että amalgaamipienloistelamppujen valovirta laskee suurimmasta arvostaan vain 1-7 %, kun taas tavanomaisella pienloistelampulla valovirran alenema on 21-24 %.



Kuva 5.10 Tavanomaisten- ja amalgaamipienloistelamppujen valovirran muutos suljetussa valaisimessa. Arvot ovat suhteellisia arvoja ja referenssiarvo on mittausaikavälin suurin arvo.

5.3.8 Lamppujen kirkkaus

Lamppujen kirkkautta kuvaavat luminanssit on esitetty taulukossa 5.7. Taulukon mukaan alimmat luminanssiarvot ovat kuvullisilla pienloistelampuilla (NL15W, PS12W ja ODS15W) ja LED- lampuilla, jotka myös ovat kuvullisia. Kuvullisten LED- ja pienloistelamppujen alemmat luminanssiarvot johtuvat opaalisesta materiaalista valmistetusta kuvusta, joka säteilee valoa tasaisesti eri suuntiin. Kierteisellä pienloistelampulla on korvaavista lampputyypeistä suurin luminanssi, mikä selittyy niiden verraten pienellä koolla. Mitatut kirkaskupuiset hehkulamput ovat selvästi kirkkaampia kuin mikään korvaavista lampputyypeistä.

Taulukko 5.7 Korvaavien lamppujen luminanssit.

	kcd/m ²
Pienloistelamput	46
MS 23W	55
MC 20W	39
PT 15W	52
ML 15W	61
NL 15W	40
ODS 15W	23
PS 12W	21
PES 12W	56
ODSMT 11W	43
GE 11W	52
ML 11W	67
LED- lamput	16
ELE 13W	19
X-LEDs 10W	13
OP 8W	19
OEL 6W	12
PM 6W	15
Hehku- ja halogeenilamput	226
B-halogeeni 30W	423
Hehku 15W	72
Hehku 60W	196
Hehku 75W	212

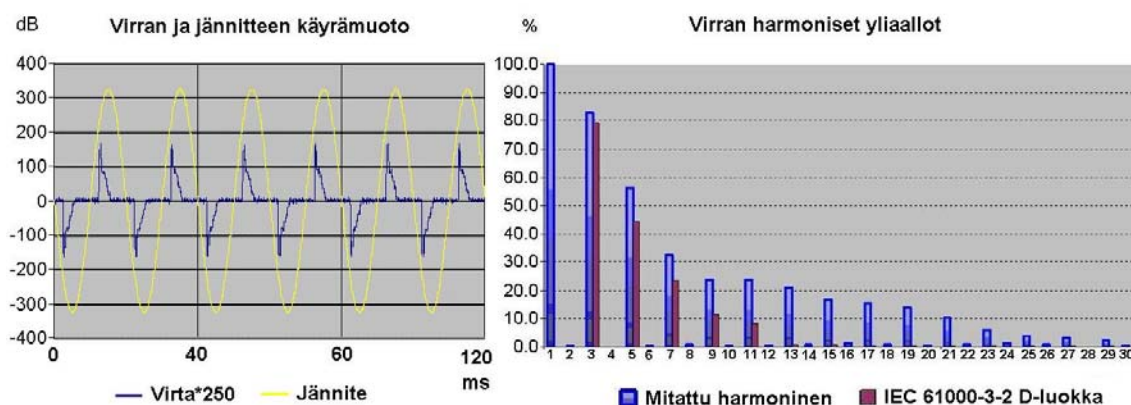
5.3.9 Sähköiset ominaisuudet - Tehokerroin ja harmoniset yliaallot

Taulukossa 5.8 on mitattujen lamppujen tehokerroin ja harmoniset yliaallot. Harmoniset yliaallot mitattiin pääosin oskilloskoopilla (Menetelmä 1). Muutamat lamput mitattiin myös tarkemmalla menetelmällä, jossa käytettiin sähkönlaatuanalyysiaattoria (Menetelmä 2). Mittausten mukaan sekä LED- että pienloistelamppujen tehokerroin oli keskimäärin 0,59.

Taulukko 5.8 LED- ja pienloistelamppujen harmoniset yliaallot ja tehokerroin.

	Teho	Virta	PF	THD %	
	[W]	[A]	%	Menetelmä 1	Menetelmä 2
Pienloistelamput	15,0	-	59 %	105 %	-
MS 23W	23,6	0,175	58 %	116 %	-
MC 20W	21,1	0,142	57 %	115 %	-
ODSSMT 18W	17,4	0,131	58 %	107 %	-
PT 15W	14,5	0,110	57 %	112 %	-
NL 15W	14,8	0,109	60 %	106 %	-
ODS 15W	15,7	0,112	63 %	94 %	-
PS 12W	10,2	0,076	58 %	119 %	-
PES 12W	11,6	0,084	60 %	110 %	-
ODSMT 11W	10,7	-	60 %	69 %	-
GE 11W	10,1	0,078	56 %	108 %	-
MD 9W	8,3	0,061	59 %	101 %	-
LED-lamput	8,0	-	59 %	88 %	-
LEDTR 14W	12,1	0,100	60 %	89 %	-
ELE 13W	10,2	0,125	37 %	35 %	-
OP 8W	7,9	0,044	81 %	27 %	-
LL 6W	6,3	-	68 %	132 %	176 %
PM 6W	6,2	0,040	68 %	73 %	78 %
OL 2W	2,1	0,024	39 %	175 %	-
Halogeenilamput	31,0	-	99 %	7 %	5 %
C 42W	42,7	-	100 %	-	1 %
B 30W	30,6	0,13	100 %	7 %	8 %

LED- ja pienloistelamppujen huono tehokerroin johtuu pääosin liitantalaitteen tasasuuntaajasta. Huonoa tehokerrointa ei LED- ja pienloistelamppujen tapauksessa aiheuta jännitteen ja virran välinen vaihe ero, vaan virran säröytyminen sinimuotoisesta. Kuvassa 5.11 on yhden mitatun lampun virran harmoniset yliaallot. Kuvasta näkyy myös sinimuotoisesta poikkeava virran käyrämuoto. Harmonisia yliaaltoja on kuvassa verrattu IEC standardiin 61000-3-2, joka määrittelee raja-arvot harmonisille yliaaltokomponenteille. (Basu, Bollen, 2010). Mitattujen LED- lamppujen harmoninen särökerroin (THD) oli keskimäärin 88 % ja pienloistelamppujen 105 %, mikä tarkoittaa että korvaavien lamppujen virrassa on verraten suuri määrä harmonisia komponentteja perusaallon lisäksi.



Kuva 5.11 Pienloistelampun (MS23W) virran ja jännitteen käyrämuoto sekä taajuuden 50Hz (1) monikerrat 2, 3, 4 jne virrassa ja vertailu IEC- standardin raja-arvoihin koskien harmonisia yliaaltoja.

Särovirta kasvattaa lampun kokonaisvirtaa, mikä varaa siirtokapasiteettia verkosta ja lisää häviöitä. Virta määräytyy tehosta (P), jännitteestä (U) ja tehokertoimesta (PF) kaavalla

$$I = \frac{P}{U * PF} \quad (8)$$

eli virta on kääntäen verrannollinen tehokertoimeen. Tällöin tehokertoimen ollessa esimerkiksi 0,6 on virta 1,67 kertainen verrattuna saman tehoiseen hehkulamppuun, jonka tehokerroin on 1 ja virta sinimuotoinen.

5.3.10 Himmennyksen vaikutus valo- ja sähkötekniisiin arvoihin

Taulukossa 5.9 on valo- ja sähkötekniset suureet, kun lamppu oli kytketty TRIAC:iin ja himmennin säädetty arvoihin 100 %, 75 % ja 50 %. Taulukon mukaan himmennys huonontaa selvästi LED- ja pienloistelampun lampun tehokerrointa ja kasvattaa harmonisia yliaaltokomponentteja. Himmennys täydestä tehosta 50%:iin kaksinkertaistaa sekä LED- että pienloistelampun virran harmonisen särökertoimen (THD).

Himmennys 50 %:iin pienentää LED- lampun värilämpötilaa noin 50 K eli värisävy muuttuu hieman lämpimämmäksi. Himmennys 75%:iin muuttaa pienloistelampun värilämpötilaa arvosta 2793K arvoon 2713K. Kuitenkin himmentäminen edelleen 50 %:iin muuttaa värilämpötilan arvoon 2777 K eli lähemmäs 100% arvoa. Pienet muutokset värilämpötilassa voivat johtua osin myös mittausepävarmuudesta.

Taulukko 5.9 Himmentämisen vaikutus LED- ja pienloistelamppujen valo- ja sähkötekniisiin arvoihin.

LED 6W	100 %	75 %	50 %
Valovirta [lm]	290	160	48
Valovirta %	100 %	55 %	17 %
CCT[K]	2776	2750	2725
CRI (R _a)	83,3	83,3	84,5
Virta [A]	0,04	0,05	0,03
PF %	63 %	41 %	32 %
THD %	88 %	175 %	177 %
Pienloiste 9W	100 %	75 %	50 %
Valovirta [lm]	391	103	25
Valovirta %	100 %	26 %	6 %
CCT[K]	2793	2713	2777
CRI (R _a)	82,8	83,8	82,4
Virta [A]	0,10	0,15	0,14
PF %	38 %	25 %	26 %
THD %	107 %	162 %	206 %

5.4 Yhteenveto mittaustuloksista

5.4.1 Mitattujen lamppujen valotekniset ominaisuudet

Pienloistelamppujen valotehokkuus oli keskimäärin 58 lm/W ja ympärisäteilevien LED-lamppujen 47 lm/W. Sekä LED- että pienloistelamppujen valovirta vastasi melko hyvin valmistajien ilmoittamia nimellisvalovirtoja. Standardin (IEC, 1987c) vaatimuksen mukaan 100h polton jälkeen mitatun valovirran täytyy olla vähintään 90 % nimellisvalovirrasta. Kaikki pienloistelamput täyttivät vaatimuksen. Mitattujen pienloistelamppujen 100 h jälkeen mitatun valovirran ja nimellisvalovirran ero vaihteli välillä -5...13 %. Myös ympärisäteilevät LED- lamput pääosin täyttivät asetuksen

vaatimuksen. Kuitenkin yhden tuotteen 100 h jälkeen mitattu valovirta oli 11 % alempi kuin nimellisarvo.

Pienloistelamppujen valovirran alenema 100 h mittauksesta 2000 h mittaukseen oli 5...19 %. Kuvullisten lamppujen valovirran alenema oli selvästi suurempi kuin kuvuttomien pienloistelamppujen. Kuvuttomien lamppujen valovirran alenema vaihteli välillä 5...8 %, kun taas kuvullisten pienloistelamppujen vaihteluväli oli 12...19 %. Kaikki pienloistelamput kuitenkin täyttivät asetuksen 244 vaatimuksen, joka on 20 % kuvullisille ja 15 % kuvuttomille pienloistelampuille. LED- lamppujen valovirta oli 2000 h mittaukseen mennessä laskenut 0...3 %.

Mitattujen LED- lamppujen värielämytilat olivat 2700...3000 K ja pienloistelamppujen 2500...3000 K. Hehkulamput (2500...2900 K) voi siis korvata kummalla tahansa näistä lamputyypeistä värisävyn juuri muuttumatta. Myynnissä on kuitenkin värisävyiltään myös kylmäsävyisiä (6000...6500 K) LED- ja pienloistelamppuja (luku 4). Tällöin on mahdollista luoda korvaavilla lampuilla kylmäsävyinen valaistus, mikä ei hehkulampuilla ole ollut mahdollista. Tutkimusten mukaan kysyntää myös kylmäsävyisemmille tuotteille voi olla enemmän kuin yleisesti on luultu. Kun kuluttajat eräässä tutkimuksessa asensivat koteihinsa värielämytilaltaan kylmän ja lämpimän värisävyisiä pienloistelamppuja ja heidän mielipiteensä niiden värisävyistä kysyttiin, olivat tulokset seuraavat: 60% piti sekä kylmää että lämmintä värisävyä miellyttävänä, 20% piti enemmän kylmästä ja 10 % enemmän lämpimästä. 10 %:lle ei värisävyllä ollut merkitystä. (Emre, Sermin 2007)

5.4.2 Mitattujen lamppujen sähköiset ominaisuudet

Mitattujen lamppujen tehokerroin oli sekä LED- että pienloistelampuilla keskimäärin 0,59. Pienloistelamppujen tehokertoimen vaihteluväli oli 0,56...0,6. LED- lamppujen vaihteluväli oli suurempi: 0,39...0,8. Huono tehokerroin näkyy myös harmonisina yliaaltoina, joiden osuutta kokonaisvirrassa kuvaa harmoninen särökerroin THD. Mitattujen LED- lamppujen THD vaihteli välillä 27...175 % ja pienloistelamppujen välillä 69...116 %. Yhden LED- lampun THD oli vain 27 % eli selvästi muita pienempi. Tämä näkyi myös kyseisen lampun muita mitattuja lamppuja selvästi parempana tehokertoimena (0,8).

5.4.3 Ympäristö- ja käyttöolosuhteiden vaikutus valontuottoon

Suljettu valaisin vaikutti LED- lamppujen valontuottoon vain hieman. LED- lamppujen valovirran jatkuvan tilan arvo oli 4-5 % alempi suljetussa valaisimessa kuin ilman valaisinta. Sen sijaan tavanomaisten pienloistelamppujen valovirtaan suljettu valaisin vaikutti enemmän. Tavanomaisten pienloistelamppujen valovirta laski suljetussa valaisimessa 21-24 % suurimmasta arvostaan. Aamalgaamitekniikkaan perustuvien pienloistelamppujen valovirtaan suljettu valaisin vaikutti kuitenkin huomattavasti vähemmän. Amalgaamilamppujen valovirta tippui suljetussa valaisimessa suurimmasta arvostaan vain 1-7 %.

6 Valaistustulos asuinrakentamisessa

6.1 Yleistä

Hehkulamput ovat ympärisäteileviä valonlähteitä, joilla on verraten tasainen valovoima lähes kaikkiin suuntiin. Korvaavien lamppujen valonjako eroaa suuresti hehkulampuista. Pienloistelamppujen valonjako riippuu olennaisesti purkausputken muodosta. LED- lamppujen valovoima on joskus painottunut kohtisuoraan lampusta pois päin ja on silloin sivuille huomattavasti heikompi. LED- lamppujen valokeilan leveys ei myöskään yleensä ole kovin paljon yli 120°.

Tämän kappaleen tarkoituksena on tarkastella sitä, kuinka valaistustulos (eli valaistusvoimakkuus huoneessa) muuttuu, kun hehkulamppu korvataan LED- ja pienloistelampuilla. Pienloistelamppujen osalta aiemmat tutkimustulokset näyttäisivät viitattavan siihen suuntaan, että purkausputken muodosta johtuvat erot pienloistelamppujen säteilykuvioissa vaikuttavat vain hieman valaistustulokseen asuinrakennuksen huoneessa, jos lamppu ei ole valaisimessa (Roisin, 2007) Toisessa tutkimuksessa (Page, Praul, 1995) mitattiin valonjako tyypillisessä varjostimella varustetussa hehkulamppuvalaisimessa pienloistelampuilla sekä hehkulampuilla ja tulosten mukaan valaisimen valonjako riippui olennaisesti käytetystä lampusta. Pienloistelampuilla tulos oli huonoin sauvamaisella lampulla, joka säteili enimmäkseen sivusuuntaan, jolloin valoa absorboitui enemmän varjostimeen ja valaisimen tehokkuus jäi huonommaksi.

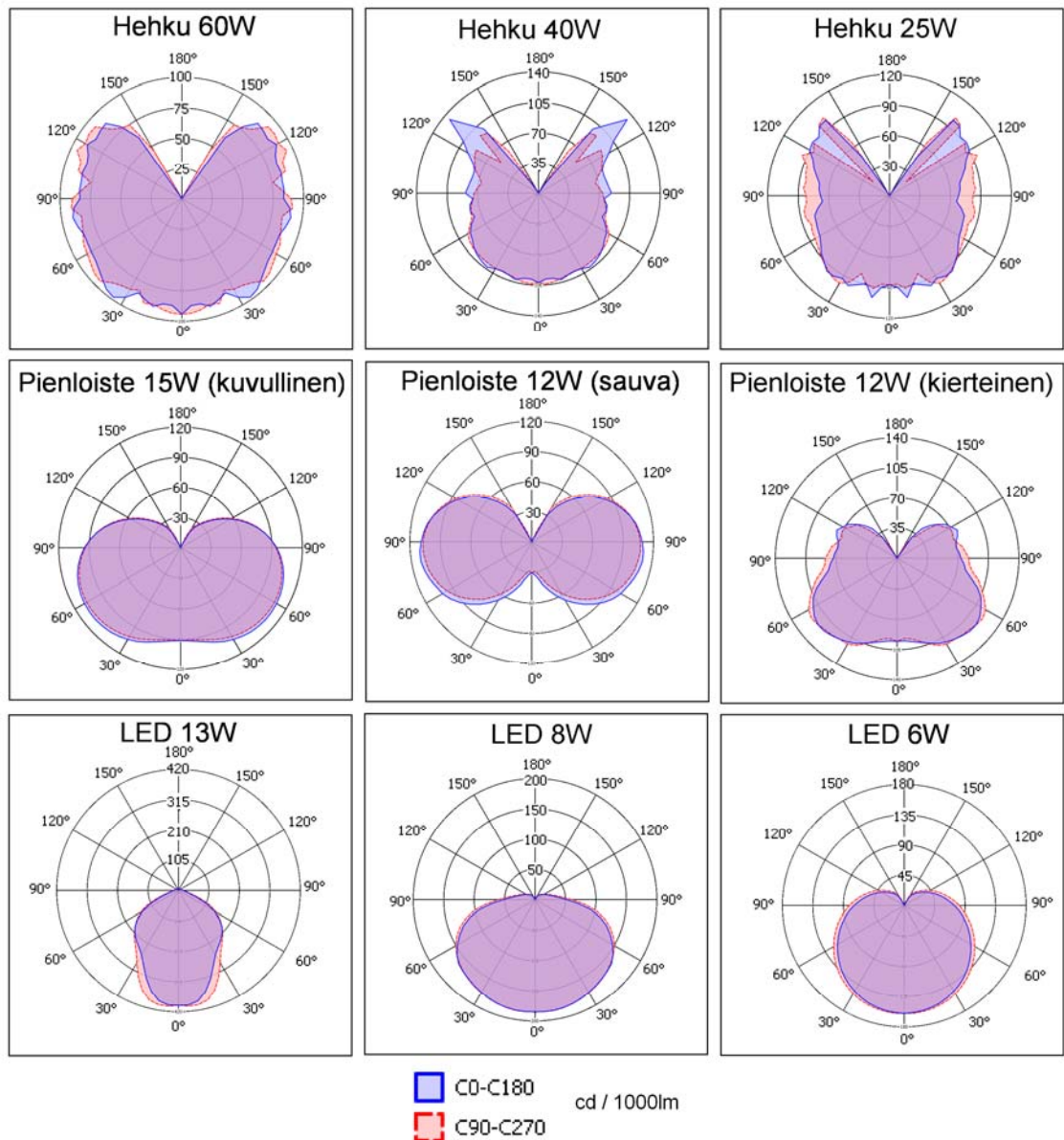
6.2 Testausmenetelmä ja mukaan valitut lamput

Valaistustulosta testattiin mittaamalla korvaavien lamppujen valonjako goniometrissä sekä ilman valaisinta että erityyppisissä asuinrakennuksista löytyvissä valaisimissa. Goniometrimittauksien tulokset muunnettiin Eulumat- tiedostoiksi, jotka ovat yhteensopivia DIALux- valaistuskalkulaattorin kanssa. DIALux:ssa luotiin mitoitetaan 3 m x 3 m x 2,6 m kokoinen huone, jonka heijastuskertoimet olivat 0,7 (katto), 0,5 (seinät) ja 0,2 (lattia). Valaistustulosta testattiin laskemalla DIALux:n avulla valaistusvoimakkuus huoneen eri pinnoilla.

Mittauksiin otettiin mukaan 25 W, 40 W ja 60 W hehkulamput sekä niitä valovirraltaan vastaavia LED- ja pienloistelamppuja. Mitatut LED- lamput ovat 6 W LED- lamppu (PM6W), 8 W LED- lamppu (OP8W), 13W LED- lamppu (ELE13W). Mitatut pienloistelamput ovat 12 W sauvamainen lamppu (PES12W), 12W kierteinen (PT12W) sekä 15W kuvallinen pienloistelamppu (NL15W). Kaikki pienloistelamput vastaavat valovirraltaan noin 60 W hehkulamppua. 6W LED- lamppu vastaa 25 W hehkulamppua, 8 W LED- lamppu 40 W hehkulamppua ja 13 W LED- lamppu 60 W hehkulamppua.

6.3 Korvaavien lamppujen valonjako

Kuvassa 6.1 näkyy valaistustuloksen testaukseen mukaan valittujen lamppujen valonjako. Kuvan mukaan pienloistelamppujen säteilykuviot eroavat hehkulampuista melko suuresti määrin ja erot näyttäisivät johtuvan suureksi osaksi purkausputken muodosta. Sauvamallisen pienloistelamput säteily on maksimissaan sivuille päin. Syy siihen on siinä, että säteilevä pinta-ala on suurin sivusuuntaan. Kannan ja pään suuntaan säteily on heikkoa. Kannan suuntaan säteilyä heikentää entisestään liitäntälaitteen viemä tila, kuten myös muilla pienloistelampuilla.



Kuva 6.1 Ympärisäteilevien korvaavien lampputyypin valonjako. Värät tarkoittavat C- kulmia. Lamppujen kanta on kuvissa ylöspäin suuntaan 180°. Pienloistelamput ja 13 W LED- lamppu vastaavat valovirrastaan 60W hehkulamppua. 8W LED- lamppu vastaa 40W hehkulamppua ja 6 W LED- lamppu 25 W hehkulamppua.

Kierteisen purkausputken tapauksessa olennainen ero sauvamaiseen lamppuun on, että kierteinen purkausputki säteilee sivusuunnan lisäksi runsaasti myös purkausputken pään ja kannan suuntaan. Kierteisen purkausputken synnyttämä säteilykuviokuva muistuttaa eniten hehkulamppua. Kuvallisen pienloistelamput säteilykuviokuvaan ei vaikuta purkausputken muoto. Opaalisesta materiaalista valmistettu kupu tasoittaa purkausputken synnyttämää säteilykuviota, mikä johtuu valon heijastumisesta kuvun seinämästä (Yasuda, Tanaka, 1999).

Kuvasta 6.1 näkyy myös eri tehoisten ympärisäteilevien (säteilykuviokuva vähintään 120°) LED- lamppujen valonjako. Kuvan mukaan LED- lamppujen valonjaossa on jonkin verran eroja. 6 W LED- lamput valonjako muistuttaa enemmän hehkulamppua ja säteilykuviokuva leveys on yli 120°. 13W LED- lamput säteilykuviokuva on noin 120°, mutta

sillä säteilyn intensiteetti on huomattavasti suurempi eteenpäin kuin säteilykuvion reuna-alueille.

6.4 Valaistustulos ilman valaisinta

Kuvassa 6.2 näkyy valaistustilanne, joka luotiin DIALux:n avulla. Kuvan 6.2 huoneen mitat ovat 3 m x 3 m x 2,6 m. Lampun vaakasuuntaiset koordinaatit (leveys, pituus) huoneessa ovat (1,5 m, 1,5 m) ja lamppu on 2 metrin korkeudella. Käyttötason mitat valaistustilanteessa ovat 2,5 m x 2,5 m ja korkeus 0,8 m. Taulukossa 6.1 on DIALux:n avulla laskettu käyttötason ja seinien keskimääräinen-, minimi-, ja maksimivalaistusvoimakkuus sekä yleistasaisuus, kun lamppu ei ole valaisimessa.

Taulukko 6.1 Käyttötason ja seinien keskimääräinen-, minimi- ja maksimi valaistusvoimakkuus sekä yleistasaisuus ilman valaisinta. Käyttötason korkeus on 0,8 m ja koko 2,5 m x 2,5 m.

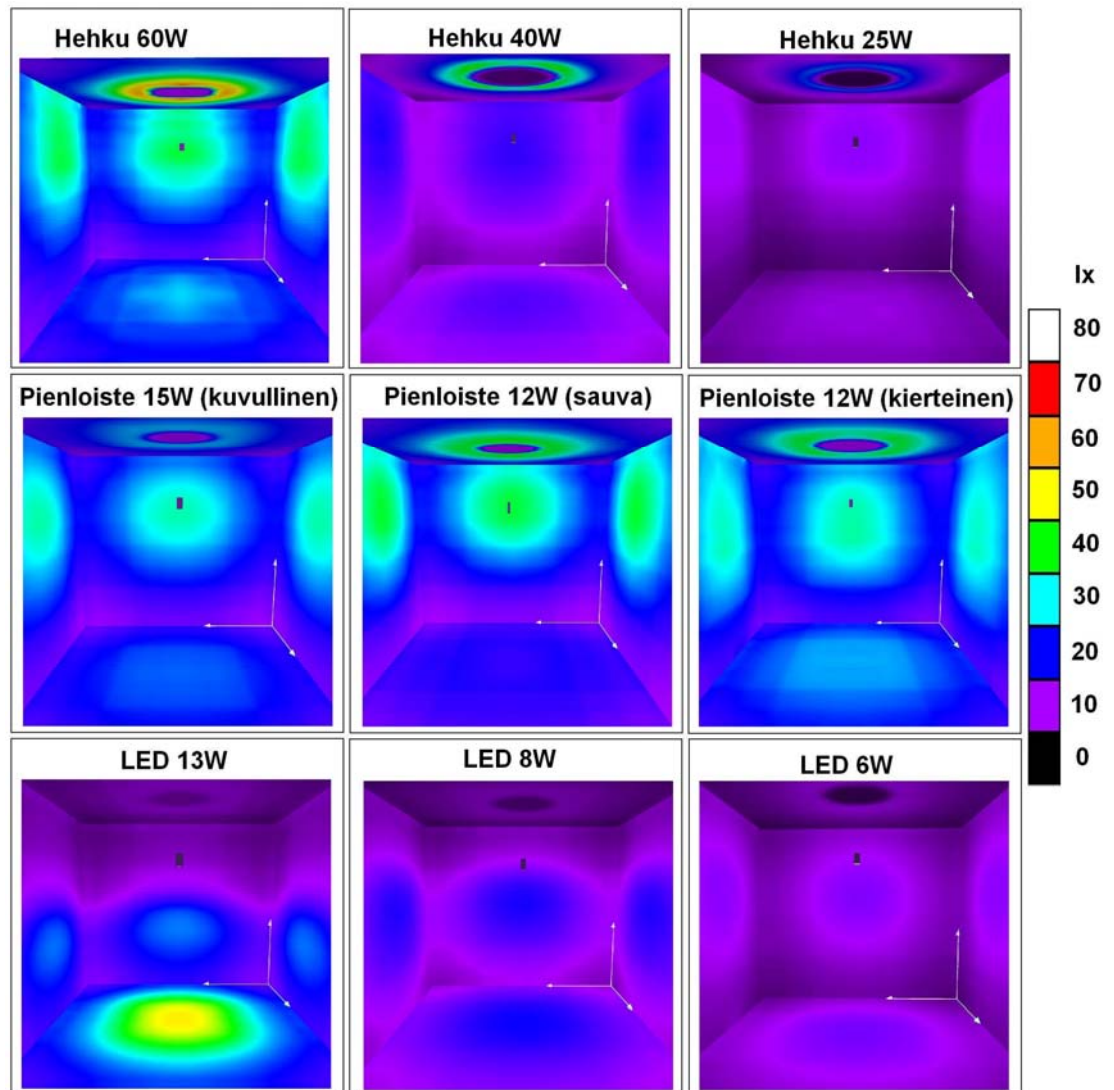
Käyttötaso (0,8m)	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min}/E_m [lx]
Hehku 25W	12	7	19	0,60
Hehku 40W	19	11	32	0,59
Hehku 60W	36	22	59	0,61
Pienloiste 15W (Kuvallinen)	33	20	49	0,60
Pienloiste 12W (Sauva)	28	20	33	0,71
Pienloiste 15W (Kierteinen)	38	22	55	0,59
LED 13W	49	15	138	0,32
LED 8W	24	11	46	0,48
LED 6W	16	8	30	0,49
Seinät	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min}/E_m [lx]
Hehku 25W	7	4	13	-
Hehku 40W	11	6	19	-
Hehku 60W	23	12	38	-
Pienloiste 15W (Kuvallinen)	21	11	33	-
Pienloiste 12W (Sauva)	22	10	38	-
Pienloiste 15W (Kierteinen)	23	13	34	-
LED 13W	13	5	25	-
LED 8W	11	5	19	-
LED 6W	8	5	12	-

Kuvasta 6.2 voidaan nähdä, että kaikkien pienloistelamppujen valaistusvoimakkuuden jakautuminen huoneessa muistuttaa hyvin suuresti niitä valovirraltaan vastaavaa 60 W hehkulamppua. Sauvamainen lamppu säteilee valoa hieman enemmän seiniin kuin muut pienloistelamput, kun taas alaspäin valoa menee hiukan vähemmän. Pienloistelamppujen erot alaspäin suuntautuvan valon osalta käyvät ilmi myös taulukon 6.1 käyttötason (korkeus 0,8 m) valaistusvoimakkuuksista. Sauvamaisen lampun käyttötason keskimääräinen valaistusvoimakkuus on 28 lx, kun taas kierteisen lampun 38 lx.

60 W hehkulamppua valovirraltaan suurin piirtein vastaavan 13 W LED- lampun valaistusvoimakkuuden jakautuminen sen sijaan eroaa melko suurestikin hehkulampusta. Kuvasta 6.2 voidaan nähdä, että valo on suuntautunut hyvin suuressa määrin alaspäin, jolloin seinät ja katto jäävät huomattavan pimeiksi. 13 W LED- lampun käyttötason valaistusvoimakkuus onkin 36 % suurempi kuin hehkulampun (taulukko 6.1). Seinien keskimääräinen valaistusvoimakkuus on 60 W hehkulampulla kuitenkin noin 77 % 13 W LED- lampua suurempi.

13 W LED- lampun käyttötason yleistasaisuus on vain 0,32, kun taas hehkulampun yleistasaisuus on 0,61. Tämä johtuu siitä, että LED- lampun valovoima on huomattavan suuri kohtisuoraan eteenpäin, kun taas hehkulamppu säteilee tasaisemmin kaikkiin suuntiin. Kuitenkin 6 W hehkulampun, jonka valovirta vastaa 25 W hehkulamppua, käyttötason yleistasaisuus on huomattavasti parempi (taulukko 6.1). Eri tehoisten LED-lamppujen käyttötason yleistasaisuuden suuret erot johtuvat siitä, että tehokkaamman 13

W LED- lampun valovoima on suuntautunut huomattavasti enemmän eteenpäin, kun taas 6 W LED- lampun valonjako on tasaisempi, kuten voidaan havaita kuvasta 6.1.

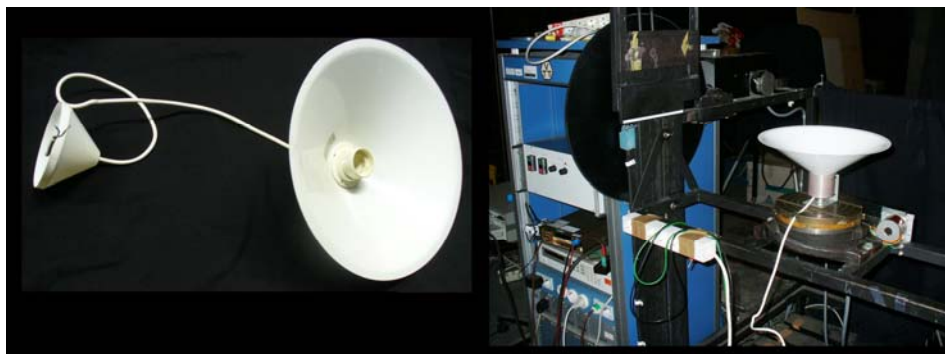


Kuva 6.2 Valaistusvoimakkuuden jakautuminen huoneessa ilman valaisinta. 13 W LED- lampun ja pienloistelamppujen valovirta vastaa noin 60 W hehkulamppua. 8 W ja 6 W LED- lamput vastaavat 40 W ja 25 W hehkulamppuja. Huoneen mitat 3 m x 3 m x 2,6 m ja heijastuskertoimet 0,7 (katto), 0,5 (seinät) ja 0,2 (lattia). Lamppu on huoneen keskellä 2 m korkeudella.

6.5 Valaistustulos erityyppisillä valaisimilla

6.5.1 Ripustettava kattovalaisin

Kuvassa 6.3 on tyypillinen, ripustettava kattovalaisin, jollaista käytetään kotitalouksissa yleisvalaistukseen. Suurin hehkulampputeho, joka valaisimeen käy on 60 W. Mittauksissa käytettiin 25 W, 40 W ja 60 W hehkulamppuja, erityyppisiä 60 W hehkulamppua valovirraltaan vastaavia pienloistelamppuja sekä valovirraltaan noin 25 W, 40 W ja 60 W hehkulamppuja vastaavia 6 W, 8 W ja 13 W LED- lampuja.



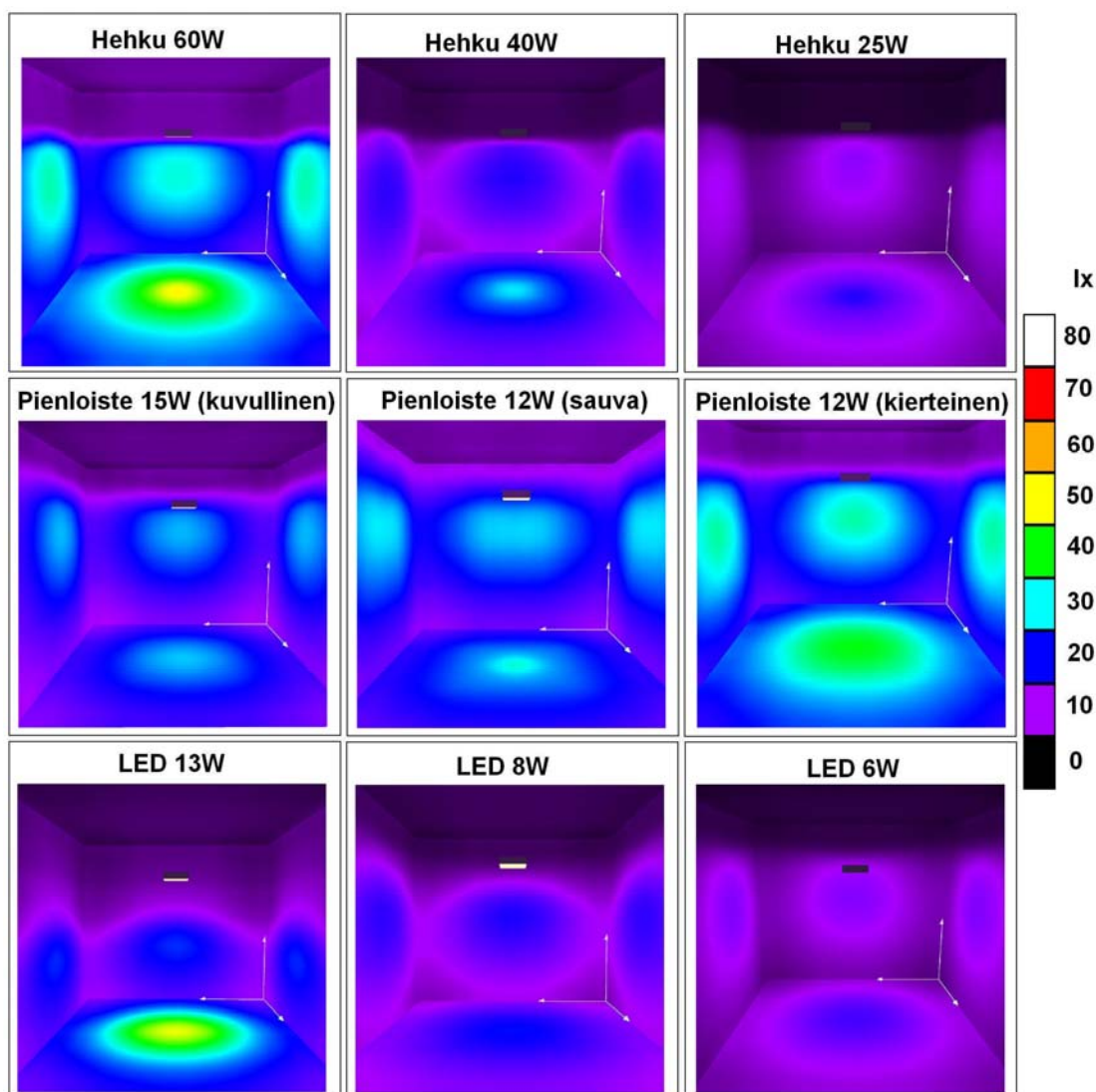
Kuva 6.3 Kattoon ripustettava yleisvalaisin.

Kuvassa 6.4 on DIALux:n avulla luotu ripustettavan kattovalaisimen valaistustilanne. Huoneen mitat valaistustilanteessa ovat 3 m x 3 m x 2,6 m. Valaisimen koordinaatit huoneessa ovat (1,5 m, 1,5 m, 2,0 m). Huonepintojen heijastuskertoimet ovat 0,7 (katto), 0,5 (seinät) ja 0,2 (lattia). Käyttötason korkeus on 0,8 m ja sen mitat ovat 2,5 m x 2,5 m.

Taulukko 6.2 Käyttötason ja seinien keskimääräinen-, minimi-, ja maksimivalaistusvoimakkuus sekä yleistasaisuus, kun valaisimena on kuvan 6.3 valaisin. Käyttötason korkeus on 0,8 m ja mitat 2,5 m x 2,5 m.

Käyttötaso	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min}/E_m [lx]
Hehku 60W	48	20	127	0,42
Hehku 40W	27	11	74	0,40
Hehku 25W	16	6	45	0,40
Pienloiste 15W (kuullinen)	32	16	65	0,49
Pienloiste 12W (sauva)	34	19	72	0,55
Pienloiste 12W (kierteinen)	45	21	95	0,46
LED 13W	42	13	127	0,31
LED 8W	24	11	48	0,46
LED 6W	17	8	38	0,44
Seinät	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min}/E_m [lx]
Hehku 60W	18	5	33	-
Hehku 40W	10	3	18	-
Hehku 25W	6	2	12	-
Pienloiste 15W (kuullinen)	15	5	27	-
Pienloiste 12W (sauva)	18	9	29	-
Pienloiste 12W (kierteinen)	19	5	34	-
LED 13W	11	4	22	-
LED 8W	10	3	18	-
LED 6W	7	2	12	-

Kuvasta 6.4 näkyy valaistusvoimakkuuden jakautuminen huoneen seinillä, lattialla ja katossa. Kuvan mukaan valaistustulos on pienloistelamppujen osalta paras kierteisellä lampputyypillä, jonka valaistusvoimakkuus on kaikilla huonepinnoilla lähes sama kuin 60 W hehkulampun. Lattian valaistusvoimakkuus on kuitenkin myös kierteisellä lampputyypillä jonkin verran huonompi. Kierteisen lampun paremmuus voidaan nähdä myös taulukosta 6.2, jossa on seinien ja käyttötason (korkeus 0,8 m) valaistusvoimakkuusarvot. Esimerkiksi käyttötason keskimääräinen valaistusvoimakkuus on kierteisellä lampulla 45 lx, kun taas muilla pienloistelampuilla 32-34 lx.



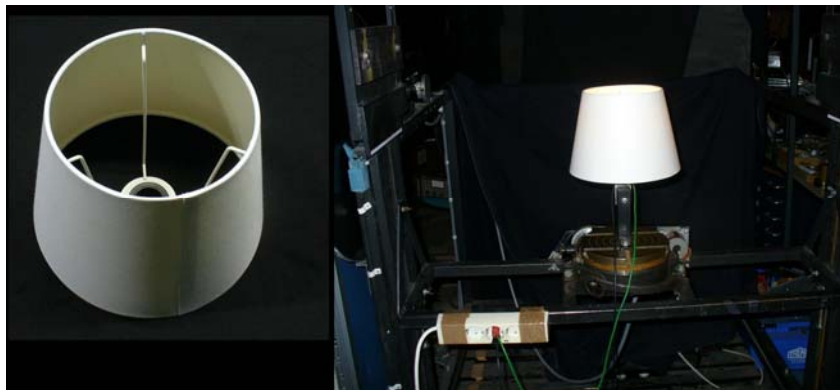
Kuva 6.4 Valaistusvoimakkuuden jakautuminen huoneessa, kun valaisimena on kattoon ripustettava yleisvalaisin. Huoneen mitat ovat 3 m x 3 m x 2,6 m ja huonepintojen heijastuskertoimet 0,7 (katto), 0,5 (seinät) ja 0,2 (lattia). Valaisimen koordinaatit (leveys, pituus, korkeus) ovat (1,5m, 1,5m, 2m).

13W LED- lampun suurin ongelma ilman valaisinta käytettäessä oli valon suuntautuminen alaspäin, jolloin keskimääräinen valaistuvoimakkuus oli käyttötasolla 36 % suurempi kuin hehkulampulla, mutta seinillä 77 % alempi. 13 W LED- lampun käyttötason valaistusvoimakkuusarvot ovat nyt suurin piirtein yhtä suuret kuin 60 W hehkulampun eli mitattu ripustettava kattovalaisin pienentää eroja käyttötason valaistustuloksessa. Kuitenkin mittauksen mukaan 13W LED- lampulla valaistusvoimakkuus seinällä on edelleen hehkulamppua huonompi (kuva 6.4). Keskimääräinen valaistusvoimakkuus seinällä on 60 W hehkulampulla nyt 18 lx, kun taas 13 W LED- lampulla 11 lx. (taulukko 6.2).

6 W ja 8W LED- lampuilla, joiden valovirrat vastaavat 25 W ja 40 W hehkulamppuja, valaistustulos vastaa erittäin hyvin hehkulamppuja kaikilla huonepinnoilla, kuten voidaan nähdä kuvasta 6.4. Suurin ero hehkulamppuun on LED- lampujen käyttötason maksimivalaistusvoimakkuudessa, joka kummallakin LED- lampulla on hieman valovirraltaan vastaavaa hehkulamppua alempi (taulukko 6.2). Seinien valaistusvoimakkuusarvot ovat kummallakin LED- lampulla yhtä suuret kuin valovirraltaan vastaavalla hehkulampulla (taulukko 6.2).

6.5.2 Varjostin

Kuvassa 6.5 on tyypillinen kotitalousvalaisimissa käytetty lampun varjostin. Varjostin estää valon pääsyn sivuille toimien siten häikäisyuojana, mutta ylös- ja alaspäin suuntautuva valo pääsee varjostimesta ulos. Varjostimia käytetään sekä yleisvalonlähteenä että joissakin tapauksissa myös lukuvaloksi. Lukukäytössä alaspäin suuntautuvan valon merkitys on suuri.

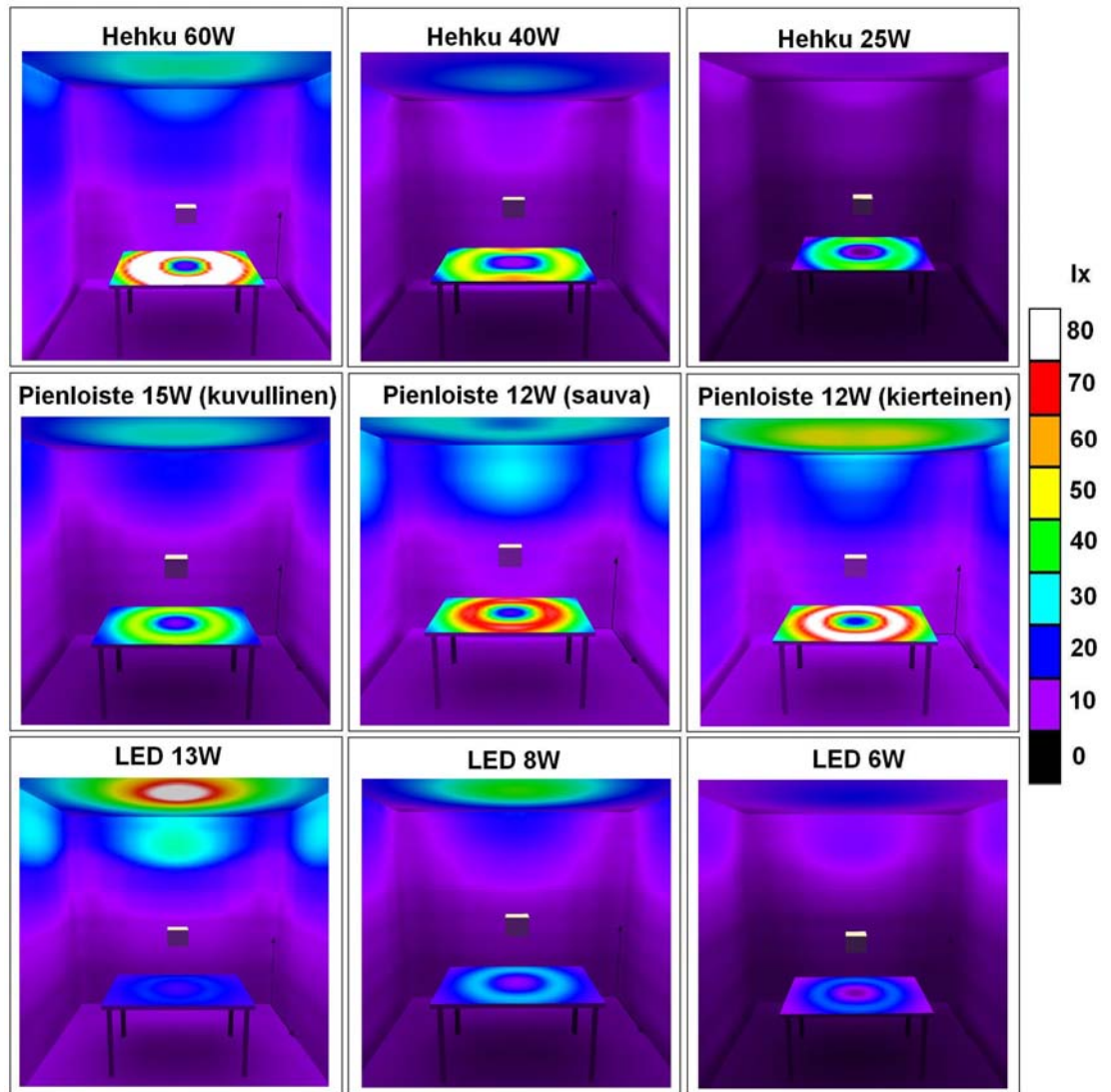


Kuva 6.5 Lampun varjostin ja sen mittausjärjestely goniometrissä.

Kuvassa 6.6 näkyy DIALux:n avulla luotu valaistustilanne. Huoneen mitat ovat 3 m x 3 m x 2,6 m. Sekä pöytä että varjostin sijaitsevat huoneessa leveys- ja pituussuunnassa koordinaateissa (1,5 m, 1,5 m). Pöytä on 0,75 m korkea ja varjostin sijaitsee 1,3 m korkeudella eli 0,55 m pöytätason yläpuolella.

Kuvasta 6.6 ja taulukosta 6.3 voidaan nähdä, että pöytätason valaistustulos on pienloistelamppujen osalta paras kierteisellä lampputyypillä, jolla pöytätason keskimääräinen valaistusvoimakkuus on 62 lx, kun taas muilla pienloistelampuilla pöytätason valaistusvoimakkuus on keskimäärin 35-51 lx. Kuitenkin valovirraltaan pienloistelamppuja vastaavan 60 W hehkulampun keskimääräinen valaistusvoimakkuus pöytätasolla on 75 lx. Myös seinillä ja katossa kierteisen pienloistelampputyypin keskimääräinen- maksimivalaistusvoimakkuus on hieman suurempi kuin muiden pienloistelamppujen.

Kuvasta 6.6 ja taulukosta 6.3 nähdään myös LED- lampun vaikutus valaistustulokseen. 6W ja 8W LED- lampuilla keskimääräinen valaistusvoimakkuus on niitä valovirraltaan vastaavia 25 W ja 40 W hehkulamppuja suurempi seinillä ja katossa, mutta pöytätasolla keskimääräinen valaistusvoimakkuus on LED- lampuilla hehkulamppua alempi. 13W LED- lampulla keskimääräinen valaistusvoimakkuus on katossa valovirraltaan vastaavaa 60 W hehkulamppua suurempi, mutta pöytätason valaistusvoimakkuus on vain 19 lx, kun taas 60W hehkulampulla pöytätason keskimääräinen valaistusvoimakkuus on 75 lx.



Kuva 6.6 Valaistusvoimakkuuden jakautuminen huoneessa kun valaisimena on lampun varjostin. Huoneen mitat ovat 3 m x 3 m x 2,6 m ja huonepintojen heijastuskertoimet 0,7 (katto), 0,5 (seinät) ja 0,2 (lattia). Valaisimen koordinaatit huoneessa ovat (1,5 m, 1,5 m, 1,3 m). Pienloistelamppujen ja 13 W LED- lampun valovirta vastaa 60 W hehkulamppua, 8W LED- lampun 40W hehkulamppua ja 6W LED- lampun 25 W hehkulamppua.

Taulukko 6.3 Keskimääräinen-, minimi- ja maksimivalaistusvoimakkuus korvaavilla lampuilla varjostimessa. Pienloistelamppujen ja 13 W LED- lampun valovirta vastaa 60 W hehkulamppua, 8 W LED- lampun 40 W hehkulamppua ja 6 W LED- lampun 25 W hehkulamppua.

Pöytä	E_m	E_{min}	E_{max}	E_{min}/E_m
Hehku 60W	75	14	113	0,18
Hehku 40W	39	9	62	0,23
Hehku 25W	28	5	45	0,18
Pienloiste 15W (kuvullinen)	35	12	48	0,34
Pienloiste 12W (sauva)	51	15	76	0,29
Pienloiste 12W (kierteinen)	62	18	87	0,29
LED 13W	19	16	22	0,82
LED 8W	22	11	28	0,53
LED 6W	17	6	24	0,37
Seinät	E_m	E_{min}	E_{max}	E_{min}/E_m
Hehku 60W	13	5	26	-
Hehku 40W	7	3	17	-
Hehku 25W	5	2	11	-
Pienloiste 15W (kuvullinen)	10	4	22	-
Pienloiste 12W (sauva)	14	5	30	-
Pienloiste 12W (kierteinen)	14	6	33	-
LED 13W	12	5	33	-
LED 8W	8	3	22	-
LED 6W	6	2	13	-
Katto	E_m	E_{min}	E_{max}	E_{min}/E_m
Hehku 60W	24	13	33	0,53
Hehku 40W	15	6	26	0,37
Hehku 25W	8	4	12	0,50
Pienloiste 15W (kuvullinen)	20	10	32	0,48
Pienloiste 12W (sauva)	24	13	31	0,56
Pienloiste 12W (kierteinen)	31	12	51	0,38
LED 13W	34	15	91	0,44
LED 8W	20	7	42	0,37
LED 6W	12	7	20	0,55

6.5.3 Pöytävalaisin

Kuvassa 6.7 on tyypillinen pöytävalaisin ja sen mittausjärjestely goniometrissä. Suurin hehkulampputeho, jota kyseisessä valaisimessa voi käyttää on 75 W. Mittauksissa käytettiin 25 W, 40 W ja 60 W hehkulamppuja, 60W hehkulamppua valovirraltaan vastaavia 12-15W pienloistelamppuja sekä 25 W, 40 W ja 60 W hehkulamppuja valovirraltaan vastaavia 6 W, 8 W ja 13 W LED- lamppuja.



Kuva 6.7 Pöytävalaisin ja sen mittausjärjestely goniometrissä.

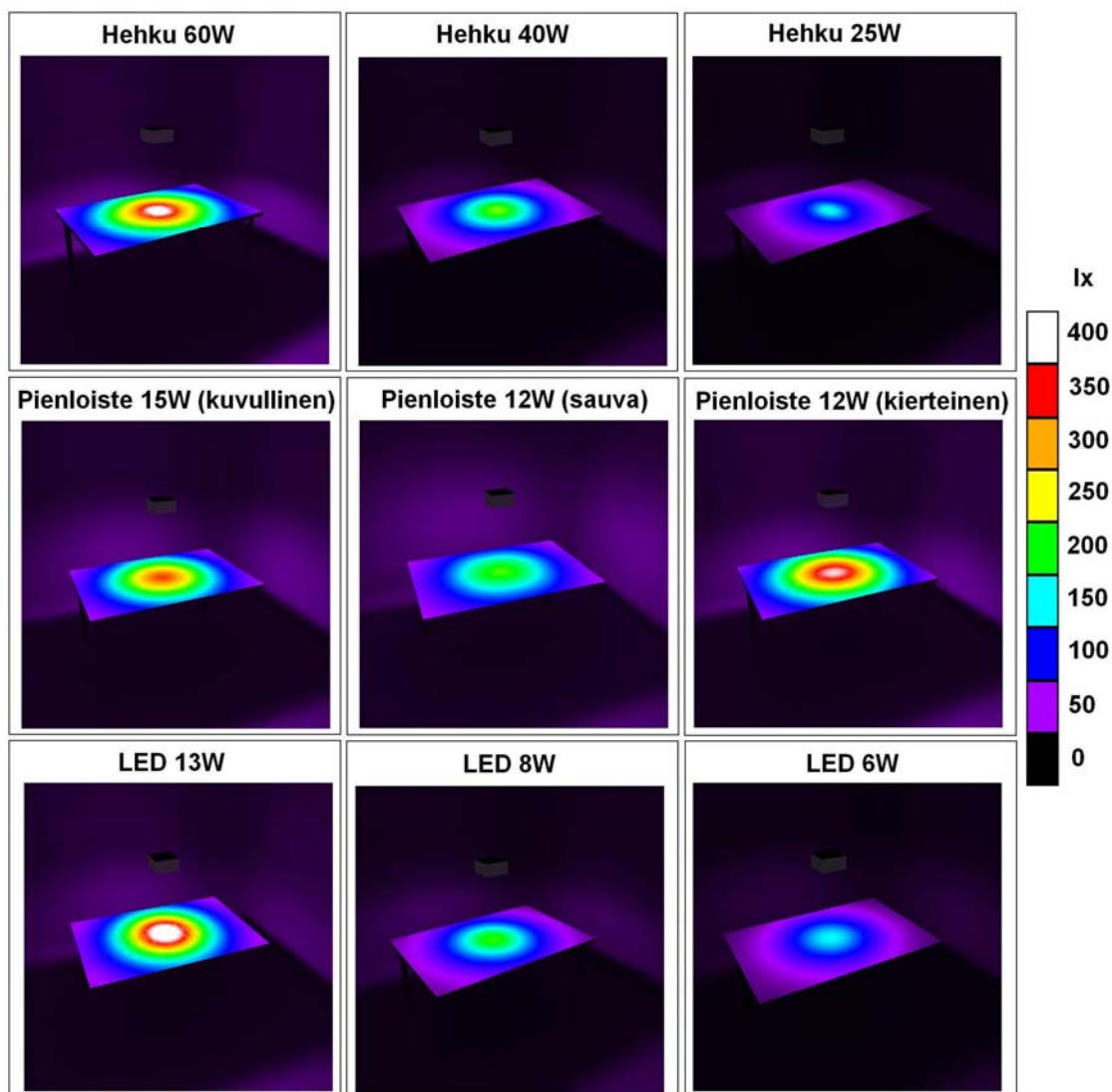
Kuvassa 6.8 on DIALux:n avulla luotu valaistustilanne, jossa huoneen mitat ovat 3 m x 3 m x 2,6 m ja valaisimen koordinaatit (leveys, pituus, korkeus) huoneessa ovat (1,5 m, 1,5 m, 1,5 m). Valaisimen valo on suunnattu siten, että se on kohtisuoraan pöytätasoon. Pöytätas on 0,750 korkuinen sen leveys- ja pituussuuntainen sijainti huoneessa (1,5 m, 1,5 m).

Taulukko 6.4 Pöytätas keskimääräinen-, minimi-, ja maksimivalaistusvoimakkuus sekä yleistasaisuus.

	E_m	E_{min}	E_{max}	E_{min}/E_m
Hehku 60W	174	54	463	0,31
Hehku 40W	92	29	230	0,31
Hehku 25W	59	18	168	0,31
Pienloiste 15W (Kuvullinen)	149	49	334	0,33
Pienloiste 12W (Sauva)	114	47	216	0,42
Pienloiste 12W (Kierteinen)	173	54	397	0,31
LED 13W	159	43	461	0,27
LED 8W	91	31	210	0,34
LED 6W	65	20	152	0,31

Kuvasta 6.8 ja taulukosta 6.4 nähdään, että 60 W hehkulamppua valovirraltaan vastaavien pienloistelamppujen osalta valaistustulos on paras kierteisellä lampputyypillä. Kierteisellä lampulla pöytätas keskimääräinen valaistusvoimakkuus on 173 lx ja 60W hehkulampulla 174 lx. Myös kierteisen lampun valaistusvoimakkuuden jakautuminen vastaa parhaiten hehkulamppua (kuva 6.8). Sauvamaisen lampun keskimääräinen ja maksimivalaistusvoimakkuus ovat huomattavasti hehkulamppua matalammat.

6W ja 8W LED- lamppujen pöytätas keskimääräinen- ja minimivalaistusvoimakkuus on likimain sama kuin niitä valovirraltaan vastaavat 25 W ja 40 W hehkulamppujen (taulukko 6.4). Maksimivalaistusvoimakkuudet ovat kuitenkin hieman pienemmät kuin hehkulampulla. Esimerkiksi 8W LED- lampun maksimivalaistusvoimakkuus on 210 lx, mutta valovirraltaan yhtä suuren 40 W hehkulampun maksimivalaistusvoimakkuus on 230 lx. Valaistusvoimakkuuden jakautuminen ei eroa kummallakaan LED- lampulla merkittävästi niitä valovirraltaan vastaavista 25 W ja 40 W hehkulampuista (kuva 6.8). 13 W LED- lampun keskimääräinen- ja minimivalaistusvoimakkuus on jonkin verran pienempi kuin sitä valovirraltaan vastaavan 60 W hehkulampulla. Kuitenkin maksimivalaistusvoimakkuus on lähes yhtä suuri kuin 60 W hehkulampulla. Myös 13 W LED- lampun valaistusvoimakkuuden jakautuminen vastaa erittäin hyvin valovirraltaan samaa tasoa olevaa 60 W hehkulamppua (kuva 6.8).



Kuva 6.8 Valaistusvoimakkuuden jakautuminen pöytätasolla, kun valaisimena on pöytävalaisin. Huoneen mitat ovat 3 m, 3 m, 2,6 m ja heijastuskertoimet 0,7 (katto), 0,5 (seinät) ja 0,2 (lattia). Valaisimen koordinaatit huoneessa ovat (1,5m, 1,5m, 1,5m). Pöytätaso on 2 m x 1,5 m kokoinen ja sijaitsee huoneen keskellä. Pöydän korkeus on 0,8 m.

6.5.4 Valaisinoptiikan vaikutus valonjakoon ja valaistustulokseen

Kaikki mittaukset tehtiin valaisimilla, joissa heijastin on mattapintainen eli se hajottaa valoa säteillen sitä tasaisesti eri suuntiin. Kotitalouksissa voi olla jonkin verran myös valoa suuntaheijastavia valaisimia. Taulukossa 6.5 on 26 W ja 32 W pienloistelampun suorituskyky uppoasennettavassa, sylinterin muotoisella peiliheijastimella varustetussa kattovalaisimessa verrattuna 100 W hehkulamppuun. Taulukosta nähdään, että 100 W hehkulampun korvaaminen sitä valovirraltaan vastaavalla 26 W pienloistelampulla mainitun tyyppisessä valaisimessa pienentää valaisimen maksimivalovoimaa. Kohtisuoraan eteenpäin säteilevä valovoima kuitenkin pysyy lähes yhtä suurena. (Hammer 1998)

Taulukko 6.5 100W Hehkulampun ja 26W ja 32W pienloistelamppujen valovoima eri kulmiin sylinterin muotoisessa, peiliheijastimella varustetussa valaisimessa. (Hammer 1998)

Lampputyyppi	0° valovoima [cd]	Maks. valovoima [cd]	Maks. / 0°
100 W hehku	214	350	1,66
26 W pienloiste	219	297	1,36
32 W pienloiste	353	493	1,25

6.6 Yhteenveto

Korvaavien lamppujen valonjako on pääosin huomattavan erilainen kuin hehkulampun. Pienloistelampun valonjako riippuu purkausputken muodosta ja on sauvamaisella lampulla painottunut sivulle, kun taas kierteinen lamppu säteilee tasaisemmin lähes kaikkiin suuntiin.

Mittausten mukaan valonjako vaikuttaa jossain määrin valaistustulokseen. Pienloistelampuilla valaistustulos oli kaikissa mittauksissa kierteisellä lampputyypillä jonkin verran muita pienloistelamppuja parempi. Huonoin valaistustulos oli sauvamaisella lampulla. Kaiken kaikkiaan pienloistelamppujen väliset erot eivät kuitenkaan olleet suuria. Vaikka kuvullisen pienloistelampun valaistustulos ripustettavan kattovalaisimen mittaustulosten mukaan on huonompi kuin sauvamaisen ja kierteisen pienloistelampun, ne kuitenkin pienemmän häikäisevyytensä ja vähemmän teknisen ulkonäkönsä takia soveltuvat tämän tyyppiseen avoimeen valaisimeen kenties muita pienloistelamppuja paremmin. Kuvullisen pienloistelampun valovirran on kuitenkin oltava jonkin verran hehkulamppua suurempi, jotta valaistustulos tämän tyyppisessä valaisimessa vastaisi hehkulamppua.

Tehokkaimman 13 W LED- lampun valonjako poikkesi huomattavasti 6 W ja 8 W LED- lampuista. 13 W lampun säteilykuvio oli 120° leveä, mutta valovoima painottui noin 60°:een leveydelle, kun taas 6 W ja 8 W LED- lamppujen säteilykuvio oli tasaisempi eri suuntiin. Tämä näkyi jossain määrin myös LED- lamppujen valaistustuloksessa. 6 W ja 8 W LED- lamppujen valovirta jakautui ripustettavassa kattovalaisimessa tasaisemmin eri huonepinnoille, kun taas 13 W LED- lampulla lattian ja käyttötason valaistusvoimakkuusarvot olivat keskimäärin suuremmat kuin seinien. Pienempitehoiset LED- lamput vastasivatkin hyvin hehkulamppuja tämän tyyppisessä valaisimessa. Pöytävalaisimessa kaikki LED- lamput vastasivat erittäin hyvin hehkulamppuja. Varjostimessa kaikkien LED- lamppujen valaistusvoimakkuusarvot olivat pöytätasolla hehkulamppuja pienemmät, mutta muilla huonepinnoilla LED- lamppujen valaistustulos ei ollut olennaisesti huonompi kuin hehkulamppujen.

7 Kustannukset

7.1 Yleistä

7.1.1 Kustannuslaskennassa käytetty menetelmä

Kustannukset laskettiin annuiteettimenetelmällä jakamalla lampun ostosta aiheutuva investointikustannus lampun eliniälle kertomalla lampun ostohinta annuiteettikertoimella. Lampun kokonaisvuosikustannus on vuotuisen investointikustannuksen ja käytöstä aiheutuvan vuotuisen energiakustannuksen summa. Käytetyt kaavat löytyvät muun muassa Suomen Valoteknillisen Seuran julkaisemasta Valaistustekniikan käsikirjasta 2 (SVS, 1982).

7.1.2 Kustannusarvioinnin lähtötiedot ja oletukset

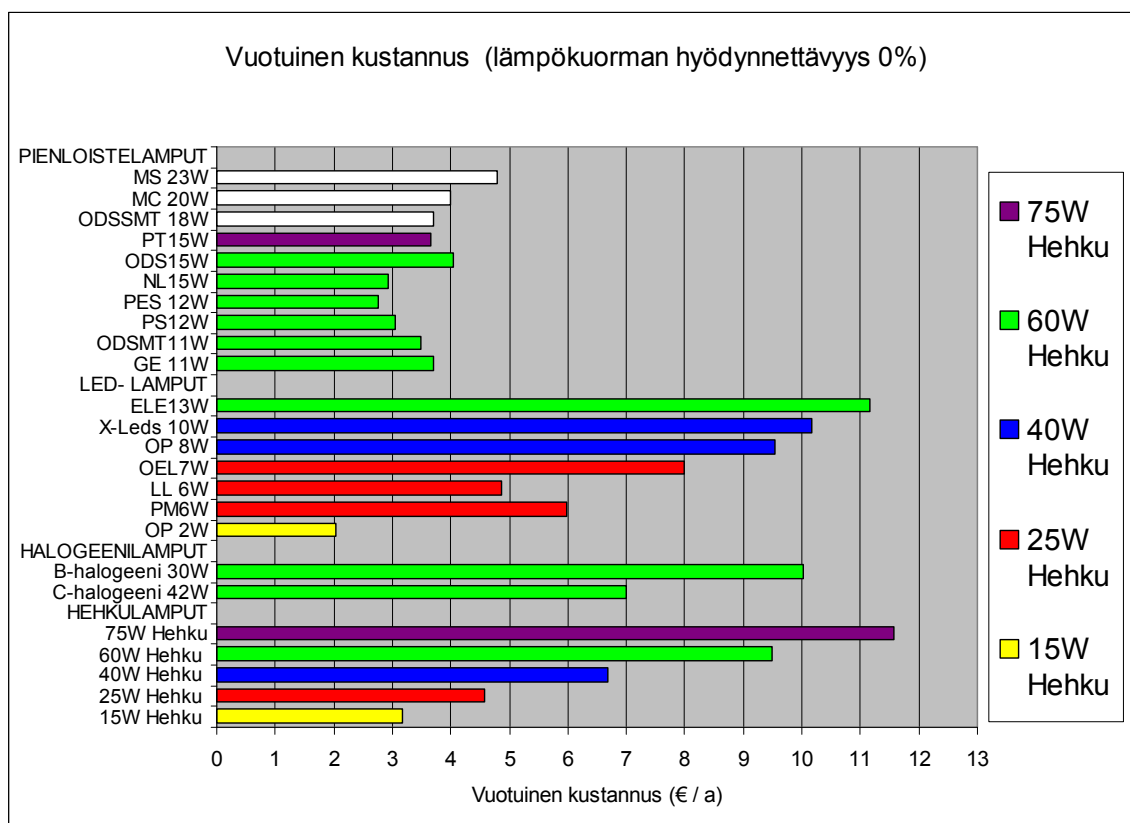
Laskennan lähtötiedot ovat seuraavat:

- Lamppujen hintatiedot ovat suurelta osin tutkimuksessa mukana olleiden lamppujen verollisia ostohintoja. Joidenkin lamppujen hintatiedot ovat muista lähteistä, joita ovat lähinnä sähkötukkuliikkeet ja ne ovat myös verollisia hintoja. Sähkötukkuliikkeissä yleisten alennusten vaikutus hintatietoihin on pyritty eliminoimaan.
- LED- lamppujen eliniäksi oletettiin 15 000 tuntia, joka vastaa valmistajien yleisesti käyttämällä 2,7 h / vuorokausi käyttömäärällä 15 vuotta. Valmistajat ilmoittavat LED- lamppujen eliniäksi 25-50 vuotta. Näin pitkällä käyttöajalla lampun valovirta ehtii todennäköisesti laskea kuitenkin niin merkittävästi, että lamppu on vaihdettava jo huomattavasti ennen valmistajien ilmoittaman käyttöiän täyttymistä. Pienloistelamppujen eliniän oletetaan kuitenkin olevan valmistajien ilmoittaman mukainen.
- Laskentakorkona on käytetty 8 %.
- Sähkön hinnaksi oletetaan 0,14 €/kWh. Tämä vastaa melko hyvin viimeaikaisia kerrostaloasujan sähkönhintoja (Tilastokeskus, 2010).
- Lamppujen kuolleisuuden ennaikaisen vikaantumisen johdosta oletetaan olevan 0 %, koska yksikään LED- tai pienloistelamppu ei mittauksissa ollut vikaantunut 3000 h mennessä.
- Vuotuisen käyttöajan oletetaan olevan 1000 h. Myös valmistajien ilmoittamissa tiedoissa lamppujen eliniän määrittäminen perustuu 1000 h vuotuisen käyttömäärään.
- Kotitalouksien hukkalämmön hyödynnettävyys: Lämmitetyissä rakennuksissa osa valaistuksen synnyttämästä lämmöstä pienentää lämmityksen tarvetta. Tällöin energiansäätön tehokkuus ei ole 100% korvattaessa hehkulamput vähemmän energiaa kuluttavilla lampuilla. Vuonna 1991 Suomessa tehdyn tutkimuksen mukaan energiansäätön tehokkuus oli pientaloissa vain 35-40 %, mikä tarkoittaa, että valaistuksessa säästetty kWh lisää lämmitysenergian tarvetta 0,60-0,65 kWh (Lund, 1991). Tässä oletetaan valaistuksen lämmöstä voitavan hyödyntää 70%. Tällöin esimerkiksi 60 W hehkulampan tuottama lämpö pienentää lämmitystehon tarvetta 42 W ja 15 W pienloistelampan 10,5 W.
- Lämmitysmuotona oletetaan olevan sähkölämmitys, jolloin valaistuksen ja lämmityksen energiahinta on sama 0,14 €/kWh.

7.2 Korvaavien lamppujen vuotuinen kustannus

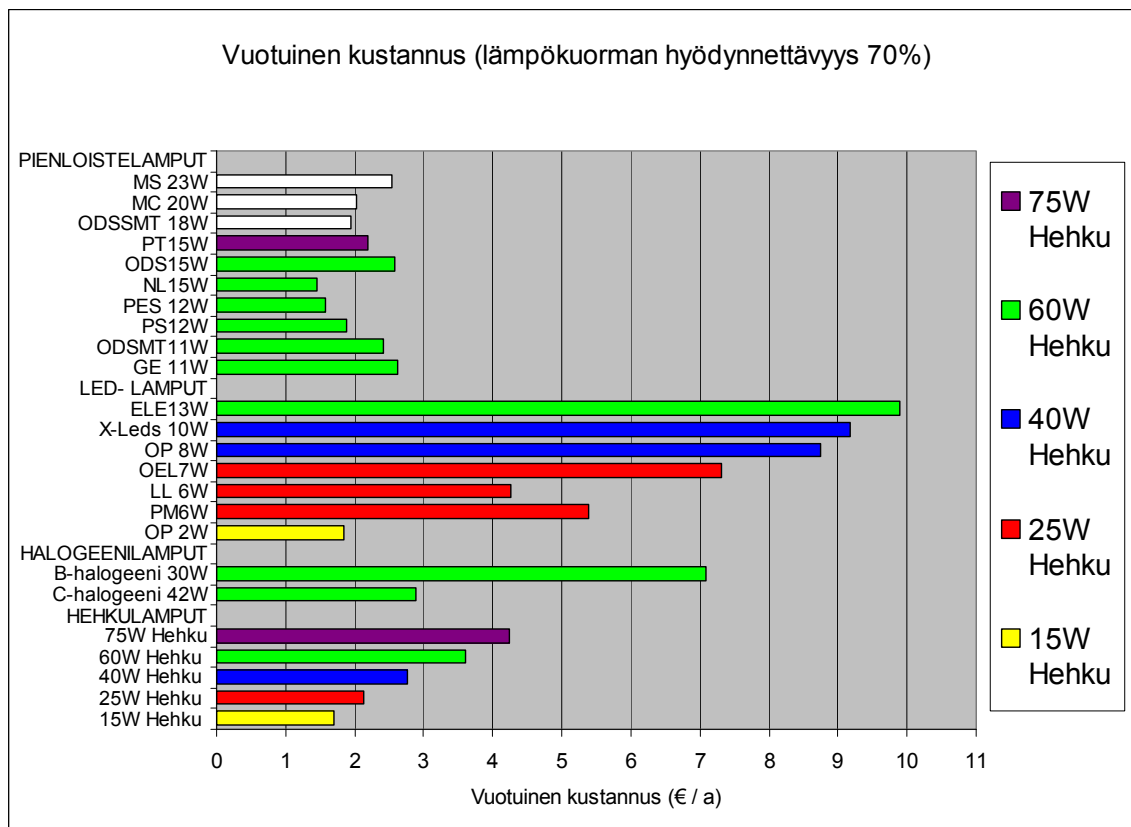
7.2.1 Vuotuinen kustannus

Kuvassa 7.1 on mittauksissa mukana olleiden lamppujen vuotuinen kustannus olettaen, että valaistuksen synnyttämää hukkalämpöä ei saada hyödyksi. Kuten taulukosta voidaan nähdä, esimerkiksi 60 W hehkulampun vuotuinen kustannus on selvästi suurempi kuin valovirraltaan vastaavien 11-15W pienloistelamppujen. Hehkulamppujen suurempi vuotuinen kustannus aiheutuu pääosin lamppujen suuremmasta energiankulutuksesta. LED- lamppujen vuosikustannus on kuitenkin hieman valovirraltaan vastaavia hehkulamppua suurempi.



Kuva 7.1 Eri tehoisia hehkulamppuja valovirraltaan vastaavien korvaavien lamppujen vuotuinen kustannus, kun lamppujen lämpökuormaa ei voida hyödyntää. Väritykset kuvaavat valovirran vastaavuutta tietyn tehoiseen hehkulamppuun. Oletukset: LED- lamppujen elinikä 15 vuotta, pienloistelamppujen elinikä valmistajan ilmoittama, energian hinta 0,14 €/kWh, korko 8% ja vuotuinen käyttöaika 1000 h.

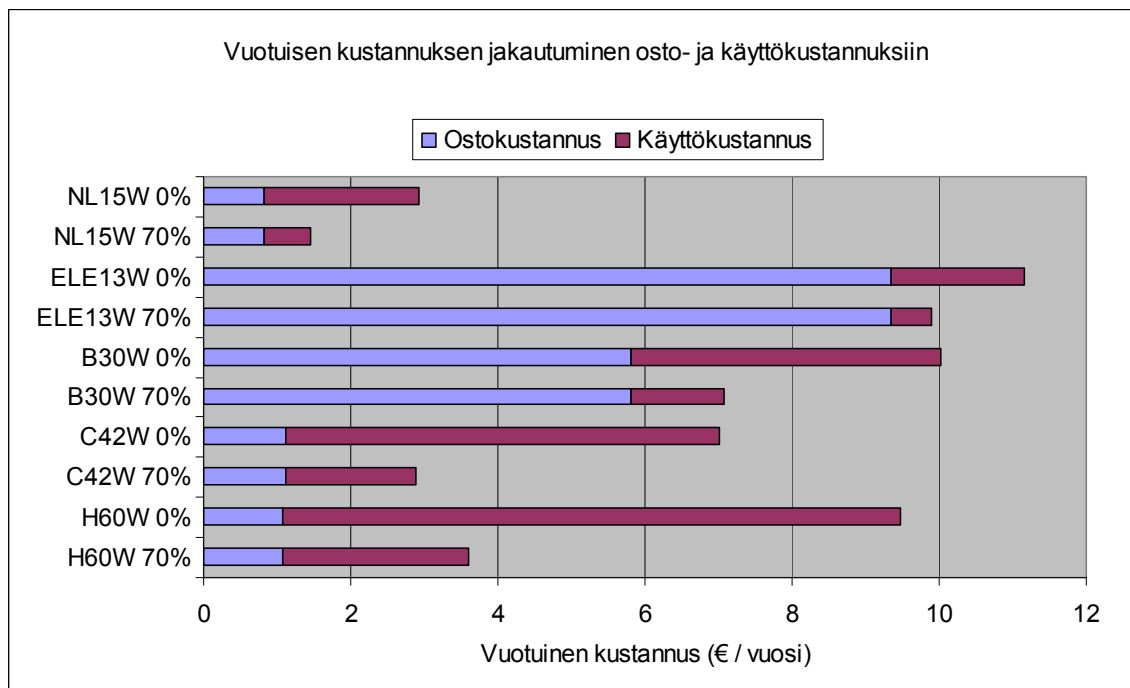
Kuvassa 7.2 on mittauksissa olleiden lamppujen vuotuinen kustannus olettaen lamppujen synnyttämästä lämmöstä saatavan hyödyksi 70 %. Jos kuvaa 7.2 verrataan kuvaan 7.1, voidaan nähdä kaikkien lamppujen kustannuksen pienentyneen. Hehkulampun kustannus on laskenut selvästi muita lamppuja enemmän. LED- lamppujen kustannus ei kuitenkaan ole muuttunut merkittävästi. Vertaamalla kuvia voidaan myös nähdä, että nyt pienloistelampun edullisuus hehkulamppuun ei ole enää yhtä ilmeinen kuin valaistuksen tuottaman lämmön hyödynnettävyyden ollessa 0%. Pienloistelamppujen vuosikustannus on kuitenkin edelleen pienempi. LED- lampun vuosikustannus suhteessa hehkulamppuun on kasvanut suuremmaksi.



Kuva 7.2 Eri tehoisia hehkulamppuja valovirraltaan vastaavien korvaavien lamppujen vuotuinen kustannus, kun valaistuksen lämmöstä voidaan hyödyntää 70%. Värit kuvaavat valovirran vastaavuutta tietyn tehoiseen hehkulamppuun. Oletukset: LED- lamppujen elinikä 15 vuotta, pienloistelamppujen elinikä valmistajan ilmoittama, energian hinta 0,14 €/kWh, korko 8% ja vuotuinen käyttöaika 1000 h.

7.2.2 Vuotuisen kustannuksen jakautuminen osto- ja käyttökustannuksiin

Kuvassa 7.3 on 60 W hehkulampun (H60W) ja sitä valovirraltaan vastaavien LED- (ELE13W) ja pienloistelampun (NL15W) sekä B- ja C- halogeenilampun vuotuisen kustannuksen jakautuminen osto- ja käyttökustannuksiin sekä hukkalämmön hyödynnettävyyden vaikutus käyttökustannukseen. Kuvan mukaan LED- lampun vuotuinen kustannus muodostuu suurimmaksi osaksi suuresta ostohinnasta. Hehkulampun kustannus sen sijaan syntyy pääosin lampun käytöstä. Hehkulampun kustannus kuitenkin pienenee huomattavasti, jos hukkalämmön hyödynnettävyys huomioidaan.

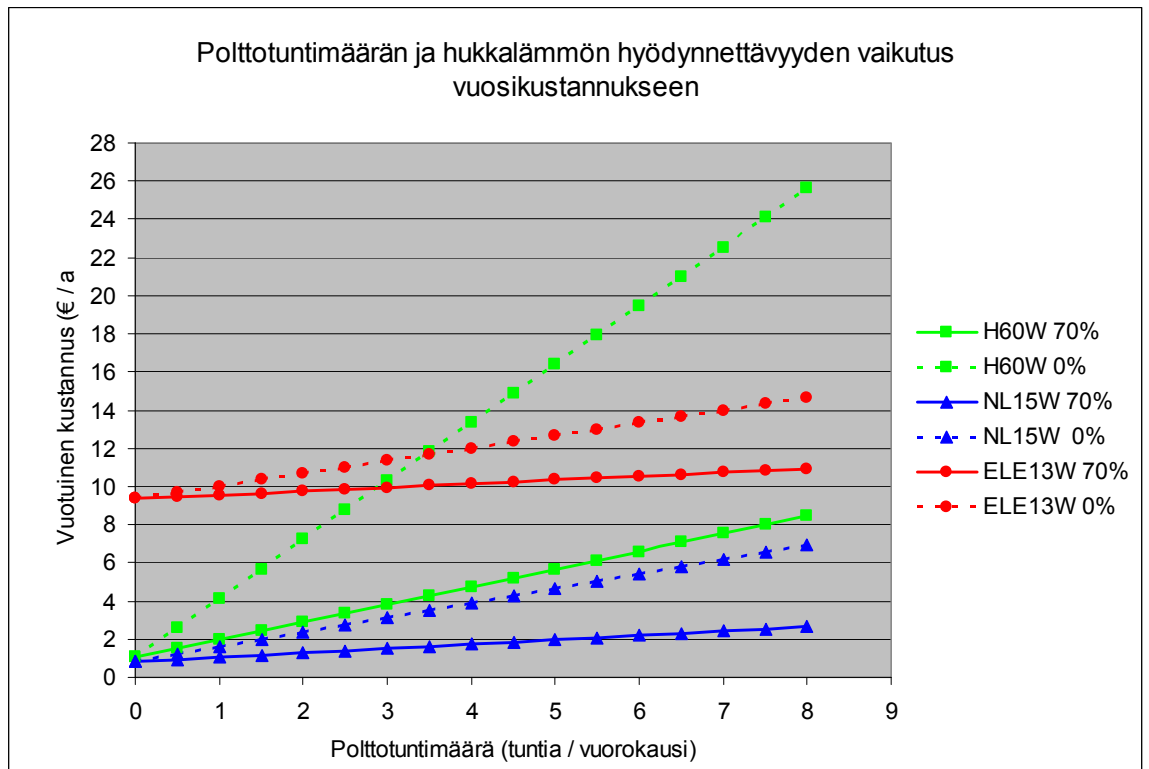


7.3 Pienloistelampun (NL15W), LED-lampun (ELE13W), B- halogeenilampun (B30W), C- halogeenilampun (C42W) ja hehkulampun (H60W) vuosikustannuksen jakautumien osto- ja käyttökustannuksiin ja hukkalämmön hyödynnettävyyden vaikutus käyttökustannukseen. Oletukset: LED- lampun elinikä 15 vuotta, sähkön hinta 0,14 €/kWh, korko 8% ja vuotuinen käyttöaika 1000 h.

7.2.3 Käyttömäärän vaikutus vuosikustannuksiin

Kuvassa 7.4 on esitetty käyttömäärän (tuntia / vuorokausi) vaikutus valovirraltaan 60 W hehkulamppua (H60W) vastaavan LED- (ELE13W) ja pienloistelampun (NL15W) vuosikustannukseen. Oletukset ovat sekä sähkö- että lämpöenergian hinta 0,14 €/kWh, LED- lampun elinikä 15 vuotta, pienloistelampun 10 vuotta, korko 8%. Lamppujen tuottaman lämmön hyödynnettävyyden oletetaan olevan 0 % tai 70 %.

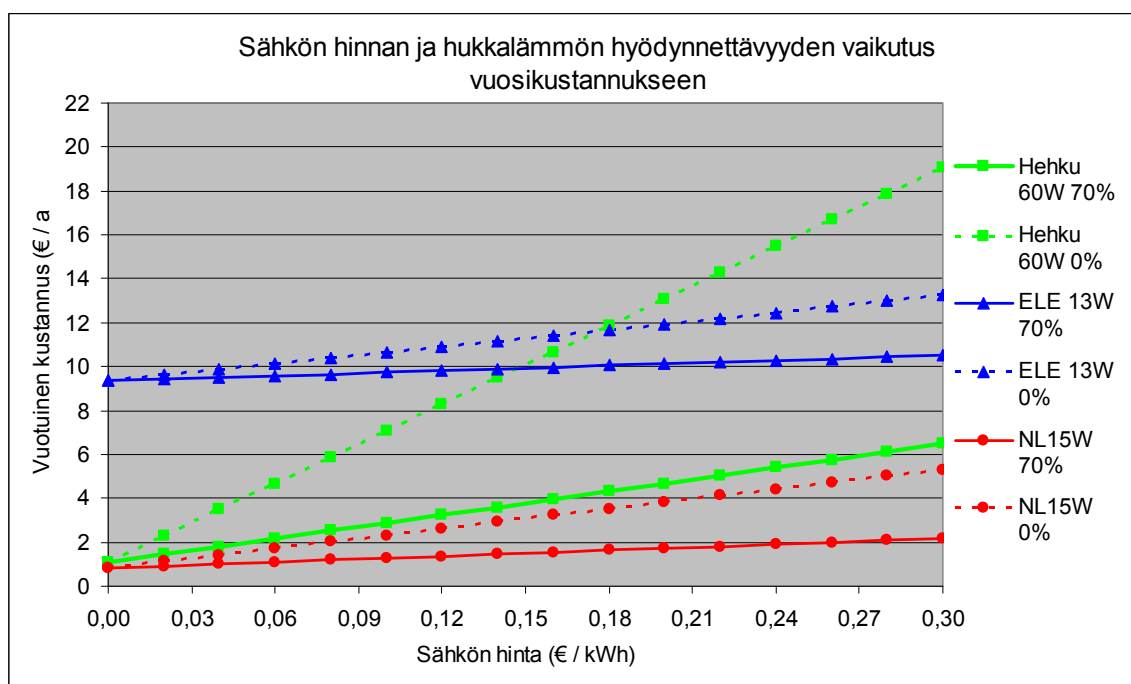
60 W hehkulampun vuotuinen kustannus riippuu erittäin voimakkaasti käyttömäärästä. Jos hehkulampun lämmittävä vaikutus huomioidaan ja oletetaan, että hukkalämmön hyödynnettävyys on 70 %, niin hehkulampun kustannusten nousu käyttömäärän kasvaessa laskee merkittävästi. Sitä vastoin LED- ja pienloistelampun vuosikustannuksen lasku huomioitaessa hukkalämpö on vähäisempää. Pienloistelampun vuosikustannus on kaikilla käyttömäärillä hehkulamppua pienempi riippumatta siitä huomioidaanko hukkalämpö vai ei. LED- lampun vuosikustannus on 3,5 h / vuorokausi käyttömäärällä yhtä suuri kuin hehkulampun, jos hukkalämpöä ei huomioida. Jos hukkalämmöstä oletetaan saatavan hyödyksi 70 %, LED- lampun vuosikustannus on kaikilla käyttömäärillä hehkulamppua suurempi.



Kuva 7.4 Käyttömäärän vaikutus 60W hehkulamppua valovirraltaan vastaavien korvaavien lamppujen vuosikustannukseen, kun hukkalämmön hyödynnettävyys on 0% ja 70%. Oletukset ovat: LED- lamppujen elinikä 15 vuotta ja sähkön hinta 0,14 €/kWh.

7.2.4 Sähkön hinnan vaikutus korvaavien lamppujen kustannuksiin

Kuvassa 7.5 on sähkön hinnan vaikutus 60 W hehkulamppua valovirraltaan vastaavan LED- ja pienloistelampun vuosikustannuksiin. Oletuksina on, että lamppujen käyttömäärä on 1000 h / vuosi, LED- lamppujen eliniät 15 vuotta, pienloistelamppujen eliniät valmistajien ilmoittamat ja korko 8 %. Kuvassa on esitetty myös valaistuksen lämpökuorman hyödynnettävyyden vaikutus vuosikustannukseen. Lämpökuorman hyödynnettävyyden oletetaan olevan tällöin 70 %. Pienloistelampun vuosikustannus on hehkulamppua pienempi riippumatta siitä, onko lämpökuorman hyödynnettävyys 0% vai 70%. Kun hukkalämpöä ei ole mahdollista hyödyntää, LED- lampun vuosikustannus alittaa hehkulampun vuosikustannuksen, kun sähkön hinta ylittää 0,18 €/kWh. Sitä vastoin, jos hukkalämpö voidaan hyödyntää, hehkulampun vuosikustannus on sähkön hinnasta riippumatta pienempi.

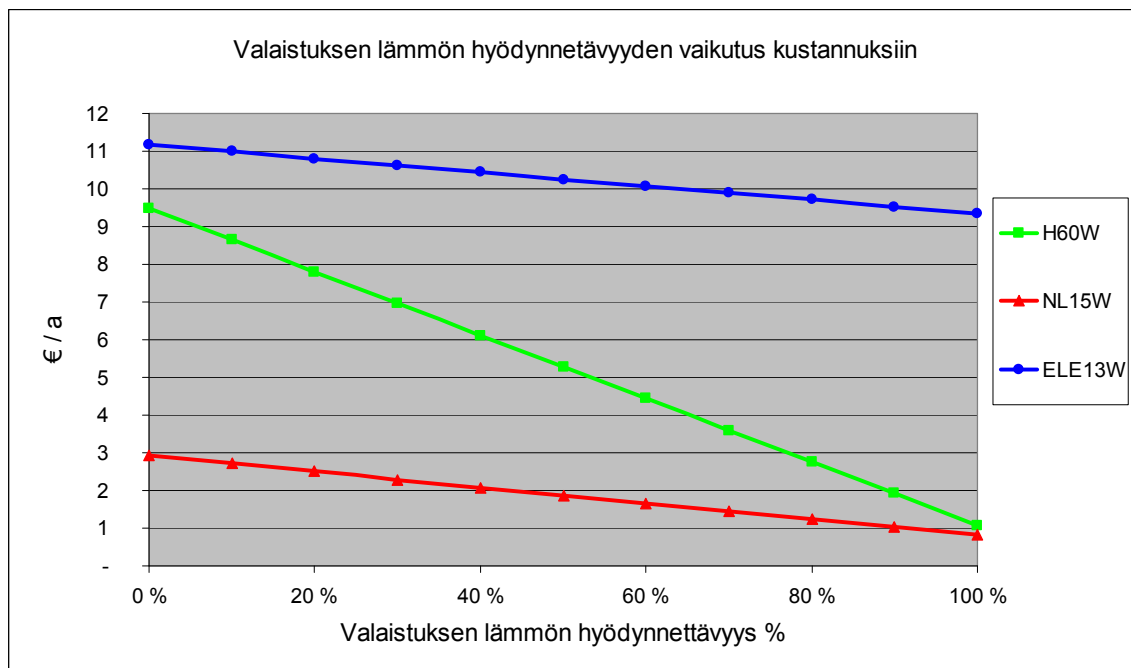


Kuva 7.5 Sähkön hinnan vaikutus vuotuisen kustannukseen 60W hehkulamppua vastaavalla LED-lampulla (ELE13W) ja pienloistelampulla (NL15W), kun hukkalämmön hyödynnettävyys on 0% ja 70%. Oletukset: LED- lampun elinikä on 15 vuotta, pienloistelampun 10 vuotta, vuotuinen käyttömäärä 1000 h ja korko 8%.

7.2.5 Hukkalämmön hyödynnettävyyden vaikutus kustannukseen

Kuvassa 7.6 on esitetty valaistuksen tuottaman lämmön hyödynnettävyyden vaikutus 60 W hehkulampun (H60W) ja sitä valovirraltaan vastaavien 13 W LED- lampun (ELE13W) ja 15 W pienloistelampun (NL15W) vuotuisen kustannukseen. Oletuksina ovat: LED- lampun elinikä 15 vuotta, pienloistelampun elinikä 10 vuotta, vuotuinen käyttömäärä 1000 h, korko 8 % sekä sähkön- ja lämmön hinta 0,14 €/kWh.

Kuvan mukaan mahdollisuus hyödyntää valaistuksen tuottamasta lämmöstä 70 % ei juurikaan vaikuta LED- ja pienloistelampun vuosikustannukseen. Esimerkiksi pienloistelampun kustannus pienenee 3 €, kun sen lämmön hyödynnettävyys nousee 0 %:sta arvoon täyteen arvoon 100 %, kun taas hehkulampun kustannus pienenee melkein 9 €. Pienloistelampun vuosikustannus on kuitenkin kaikilla hyödynnettävyysasteilla hehkulamppua pienempi.



Kuva 7.6 Lämpökuorman hyödynnettävyyden vaikutus LED-lampun (ELE13W), pienloistelampun (NL15W), ja hehkulampun (H60W) vuotuisen kustannukseen. Oletukset: Sähkö- ja lämpöenergian hinta 0,14 €/kWh, LED- lampun elinikä 15 vuotta, pienloistelampun 10 vuotta, vuotuinen käyttöaika 1000 h ja korko 8%.

8 Johtopäätökset

Asetuksen (EY) N:o 244/2009 astuessa vaiheittain voimaan hehkulamput poistuvat myynnistä vuoteen 2012 mennessä. Hehkulamput korvautuvat pääosin LED-, pienloiste- ja halogeenilampuilla. Korvaavia tuotteita on etenkin pienloistelamppujen osalta jo runsas valikoima. Tehokkaimpien myynissä olevien LED- lamppujen valovirta on 60 W hehkulamppujen luokkaa, mutta suurin osa LED- tuotteista vastaa valovirraltaan 25-40 W hehkulamppuja. Värilämpötilan suhteen kuluttajilla on LED- ja pienloistelamppujen myötä enemmän vaihtoehtoja kuin aikaisemmin, sillä myynissä on hehkulampun lämminsävyisten tuotteiden lisäksi myös kylmäsävyisiä malleja. LED- ja pienloistelampputuotteiden värintoisto-ominaisuudet keskimäärin täyttävät asetuksen 244 vaatimuksen (R_a - indeksi 80), mutta joidenkin LED- tuotteiden värintoistoindeksi on sen alle.

Pienloistelamppujen valovirta oli 2000 polttotunnin jälkeen laskenut 12 % ja LED- lamppujen 1 %. Pienloistelamppujen eliniäksi ilmoitetaan 6000-15000 tuntia ja LED- lamppujen 25000–50000 tuntia. On selvää, että LED- ja pienloistelamppujen valovirta on lähellä eliniän loppua huomattavasti nimellisarvoa matalampi. Tämän takia LED- ja pienloistelampun valovirran on oltava suurempi kuin korvattavan hehkulampun. Valmistajien on 1.9.2010 voimaan tulevien tuotetietovaatimusten myötä huomioitava korvaavien lamppujen valovirran alenema eliniän aikana ilmoittaessaan lampun vastaavan tietyn tehoista hehkulamppua (kappale 2.2.4 taulukko 2.3). Kuitenkin LED- ja pienloistelamppujen valovirta voi olla nimellisarvoa alempi myös käyttö- ja ympäristöolosuhteiden vuoksi. Mittausten mukaan suljetussa valaisimessa tavanomaisen pienloistelampun valovirta laski 21-24 %. LED- lamppujen valovirta oli suljetussa valaisimessa 4-5 % alempi kuin ilman valaisinta. Mitattujen LED- lamppujen valovirtaan suljettu valaisin vaikutti siis huomattavasti vähemmän kuin pienloistelamppuihin. Pienloistelampun valovirtaan vaikuttaa lisäksi polttoasento. Vaativissa olosuhteissa korvaavan lampun valovirran olisikin hyvä olla suurempi kuin valontuoton kannalta optimaalisissa olosuhteissa. Amalgaamitekniikka parantaa pienloistelampun suorituskykyä, kun lämpöolosuhteet ovat vaativat tai polttoasento poikkeaa optimaalisesta. Mitattujen amalgaamilamppujen valovirta laski vain 1-7 % suurimmasta arvostaan suljetussa valaisimessa.

Mitattujen pienloistelamppujen lämpenemisajat olivat 15...102 sekuntia ja kaikki mitatut lamput täyttivät asetuksen 244 vaatimukset. Vaikka vaatimukset täyttyivätkin, on lämpenemisviive syttymisviiveen ohella kenties suurin pienloistelamppujen käytettävyyttä huonontava tekijä. Suuritehoisempi lamppu pienentää lämpenemisviiveestä aiheutuvaa haittaa. LED- ja halogeenilampuilla ei ole pienloistelampuille ominaista lämpenemisviivettä, vaan ne tuottavat heti täyden valovirran.

LED- lamppujen tehokerroin oli 0,37...0,81 ja pienloistelamppujen 0,56...0,6. Huono tehokerroin johtuu lamppujen virran säröytymisestä sinimuotoisesta, mikä näkyy harmonisina yliaaltoina. Yliaallot on mahdollista suodattaa, mutta monissa lampuissa suodatusta ei ole. Sähkölaitoksen kannalta korvaavien lamppujen yleistymisen voi harmonisten yliaaltojen vuoksi muodostua ongelmaksi, koska ne varaavat siirtokapasiteettia verkosta ja synnyttävät häviöitä. Asetuksen 244 vaatimus tehokertoimelle on 0,5 alle 25 W lampuilla ja suurin osa mitatuista lampuista täytti sen. Kuitenkin tehokkaammille, vähintään 25 W lampuille asetuksen vaatimus on 0,9, joten alle 25 W lamppujen vaatimus 0,5 on verraten kevyt.

LED- ja pienloistelamppujen valonjako eroaa hehkulampuista melko suurestikin. Mittausten mukaan tämä näyttäisi vaikuttavan jossain määrin valaistustulokseen. Lamppuja testattiin kattoon ripustettavassa yleisvalaisimessa, pöytävalaisimessa sekä lampun varjostimessa. Pienloistelamppu, jonka purkausputki on kierteinen, oli kaikissa valaisimissa hieman parempi kuin sauvamainen ja kuvallinen pienloistelamppu. Jos LED- lampun valovirta on painottunut pieneen kulmaan, se voi johtaa

valaistusvoimakkuuden hehkulamppua epätasaisempaan jakautumiseen huonepinnoille. Valaistustulos kuitenkin vastasi myös LED- lampuilla melko hyvin hehkulamppua.

Korvaavien lamppujen hinnat ovat huomattavasti hehkulamppuja korkeammat. Ne kuluttavat kuitenkin käytössä merkittävästi vähemmän sähköä ja ovat merkittävästi pitkäikäisempiä, joten pitkällä aikavälillä ne voivat tulla hehkulamppua jopa huomattavasti halvemmaksi. Kustannustarkastelussa tultiin siihen tulokseen, että pienloistelamppujen osalta näin onkin. LED- lamput ovat kuitenkin vielä niin hinnakkaita, että niiden kustannukset ovat vielä hehkulamppua suuremmat. Valaistuksen tuottaman lämmön hyödynnettävyys laskee lamppujen vuotuista kustannusta. Vaikutus on suurin hehkulamppuun, jonka kustannukset suhteessa korvaaviin lamppuihin laskevat. Tällöin pienloistelamppuista koituva säästö vuosikustannuksessa pienenee. Kustannusarviossa pienloistelampun vuosikustannus oli kuitenkin suurellakin valaistuksen hukkalämmön hyödynnettävyyssasteella hehkulamppua pienempi.

9 Lähdeluettelo

Basu Supratim, Bollen M.H.J, Undeland Tore M. PFC Strategies in light of EN 61000-3-2. Raportti A123656. Bose Research. Bangalore, India. 9 s.[Viitattu 4.5.2010]

Saatavissa:

<http://mysite.valuebound.com/boseresearch/resources/RIGApaper.pdf>

Cayless M.A, Marsden A.M. 1993. Lamps and lighting. Englanti. Edward Arnold. 3. painos. ISBN: 0-7131-3487-9.

Emre Erkin, Sermin Onaygil, Önder Guler. 2007. Energy Saving by Compact Fluorescent Lamps in the Residences Considering User Satisfaction. CIE 26th session. Proceedings. Volume 1. s. D3-57.

EY 1998. Euroopan Komission direktiivi 98/11/EY neuvosto direktiivin 92/75/ETY täytäntöön panemiseksi kotitalouslamppujen energiankulutusmerkinnän osalta. Bryssel. Euroopan Komissio. 1998. 8 s.

EY 2005. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2005/32/EY energiaa käyttävien tuotteiden ekologiselle suunnittelulle asetettavien vaatimusten puitteista. Bryssel: Euroopan parlamentti ja neuvosto. 2005. 58 s.

EY 2002a. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/95/EY tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. Euroopan parlamentti ja neuvosto. 2003. 5s.

EY 2002b. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/96/EY sähkö- ja elektroniikkaromusta. Euroopan parlamentti ja neuvosto. 2003. 15s.

EY 2009a. Euroopan Komission Asetus N:o 244/2009 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2005/32/EY täytäntöön panemiseksi ympärisäteilevien kotitalouslamppujen ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta. Bryssel: Euroopan Komissio. 2009. 16 s.

EY 2009b Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/125/EY energiaa käyttävien tuotteiden ekologiselle suunnittelulle asetettavien vaatimusten puitteista. Bryssel. Euroopan parlamentti ja neuvosto. 2009. 26 s.

Gaska Remis, Shur Michael S., Zukauskas Arturas. 2002. Introduction to Solid State Lighting. Wiley. 207 s. ISBN: 0-471-21574-0.

Halonen Liisa, Lehtovaara Jorma. 1992. Valaistustekniikka. Otatieto 542. 456 s. ISBN: 951-672-145-1.

Hammer E.E. 1998. Compact light source performance in recessed type luminaires. Industry applications conference, 1998. Thirty-third IAS annual meeting. The 1998 IEEE. Vol. 3 s. 2145-2150.

IEC 1987a. Tungsten filament lamps for domestic and similiar general lighting purposes, performance requirements. IEC Publication 64. 5. painos. Geneve, Sveitsi: International Electrotechnical Comission. 45 s.

IEC 1987b. Single-capped fluorescent lamps – Safety and performance requirenments. IEC Publication 901. 1. painos. Geneve, Sveitsi. International Electrotechnical Comission. 27 s.

IEC 1987c. Self-ballasted lamps for general lighting services, performance requirements. Publication 969. Geneve, Sveitsi: International Electrotechnical Comission. 17 s.

- Labsphere 2010. Labsphere Inc. The radiometry of Light Emitting Diodes. [Viitattu 25.4.2010]. Saatavissa:
<http://www.labsphere.com/data/userFiles/The%20Radiometry%20of%20Light%20Emitting%20Diodes.pdf>
- Laperriere Andre, Martel Raynold. 1993. Performance of compact fluorescent lamps in exterior lighting fixtures at cold Temperature. Industry Applications Society Annual meeting. Conference Record of the 1993 IEEE. Vol. 3 s. 2305-2308
- Lund Peter. 1991. Energian säästö ja pienloistelamput: Porin kampanjan tuloksia. Kauppa- ja teollisuusministeriö. Energiaosasto. Katsauksia B:103. Helsinki 1991. 46s. ISBN: 951-47-4469-1.
- Motiva 2007. EuP- direktiivin (2005/32/EY) toimeenpanon energiavaikutusten arviointi. Motiva Oy. [Viitattu 25.4.2010]. Saatavissa:
http://www.tem.fi/files/20621/EuP_direktiivin_energiavaikutukset_loppuraportti_070309.pdf
- Mottier Patrick. 2009. LEDs for lighting applications. Wiley. 270 s. ISBN: 978-1-84821-145-2.
- Page Erik, Praul Chad, Siminovitch Michael. A Comparative Candlepower Distribution Analysis For Compact Fluorescent Table Lamp Systems. IES 26 No. 1. 1997.
- Roisin Benoit, Bodart Magali, Deneyer Arnaud, D'Herdt Peter. 2007. On the substitution of incandescent lamps by compact fluorescent lamps: switch on behaviour and photometric distribution. Ingenieria Iluminatului. Vol. 9, No: 19, 2007. s.50-58.
- Serres Anthony, Taelman Willy. 1993. Amalgams and compact fluorescent lamps. Industry Applications Society Annual Meeting 1993. Conference Record of the 1993 IEEE. Toronto 8.2.1993. Vol. 3: s. 2296-2304. ISBN: 0-7803-1462-X.
- Schubert E. Fred. 2003. Light-Emitting Diodes. Englanti. Cambridge University Press. 313 s. ISBN: 0-521-53351-1.
- SVS. 1982. Suomen Valoteknillinen Seura. ”Valaistustekniikan käsikirja 2”. 1982. ISBN: 951-95176-8-5.
- Tilastokeskus. 2010. Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin. Tilastokeskus. [Viitattu 3.5.2010] Saatavissa:
http://www.stat.fi/til/ehkh/2009/04/ehkh_2009_04_2010-03-24_kuv_011.html
- Tetri Eino, Halonen Liisa. 1991. Pienloistelamppujen käyttömahdollisuudet sisä- ja ulkovalaistuksessa. Raportti 914. Teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratorio. Otaniemi 1991. 152 s.
- Van Tichelen, Vercalsteren, Mudgal, Turunen, Tinetti, Thornton, Kofod, Vanhooydonck. 2009. Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs. Domestic Lighting – Final report. Euroopan Komissio. 657 s. [Viitattu 25.4.2010] Saatavissa:
http://www.valosto.com/tiedostot/EuP_Domestic_Part1en2_V11.pdf
- Yasuda Takeo, Tanaka, Toshiya, Nishio Kiyoshi, Izumi Masahiro. 1999. Technical Issues on the Electronic Compact Fluorescent Lamps Covered with a Diffusive Glass Globe. Journal of Light and Visual Environment. Vol. 21, 1999. No. 1 s. 18-21.